

Научная статья

УДК 519.876.2

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.3>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ СВЯЗЕЙ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В КОНТЕКСТЕ ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПИСАНИЯ

Жанна Бурлуцкая*, Полина Шарко, Алексей Гинцяк, Капитон Поспелов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, zhanna.burlutskaya@spbpu.com, polina.sharko@spbpu.com, gintsyak_am@spbpu.ru, kapiton.pospelov@spbpu.com

*Автор, ответственный за переписку: zhanna.burlutskaya@spbpu.com

Аннотация

Данная работа посвящена формализации задачи составления расписания в распределенных производственных системах. В рамках работы приводится исследование особенностей сложных производственных систем, включая характерную для реальных производственных систем неопределенность, мультиагентный характер взаимодействия элементов и множественность целевых функций, а также их влияние на процесс составления производственного расписания. В ходе работы приводится анализ научной литературы в области моделирования распределенных производственных систем на основании научных публикаций, представленной в Scopus и РИНЦ. На основании результатов анализа международного опыта моделирования распределенных производственных систем приводится описание структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания. Результатом работы является онтологическая модель процесса формирования расписания в распределенных производственных системах как набора стратегических взаимодействий в терминологии теории игр и мультиагентных систем. Для описания игровых взаимодействий приводится набор формализованных стратегий и выигрышей агентов при нисходящем паттерне игрового взаимодействия, также приводится описание в терминах BDI моделей агентов мультиагентной системы, участвующих в составлении производственного расписания. Также приводится онтологическая модель коммуникационной сети структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания. Полученные результаты являются основой для разработки системы поддержки принятия решений по формированию расписания в распределенных производственных системах.

Ключевые слова: производственное расписание, сложные системы, распределенные производственные системы, мультиагентный подход, теория игр.

Цитирование: Бурлуцкая Ж., Шарко П., Гинцяк А., Поспелов К., 2025. Определение и формализация связей структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания Sustainable Development and Engineering Economics. 3, 3. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.3>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Бурлуцкая Ж., Шарко П., Гинцяк А., Поспелов К., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.3>

DEFINITION AND FORMALIZATION OF THE RELATIONSHIPS OF THE STRUCTURAL ELEMENTS OF DISTRIBUTED PRODUCTION SYSTEMS IN THE CONTEXT OF THE TASK OF FORMING A SCHEDULE

Zhanna Burlutskaya*, Polina Sharko, Aleksei Gintciak, Kapiton Pospelov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, zhanna.burlutskaya@spbpu.com, polina.sharko@spbpu.com, gintsyak_am@spbstu.ru, kapiton.pospelov@spbpu.com

*Corresponding author: zhanna.burlutskaya@spbpu.com

Abstract

This paper is devoted to formalizing the task of scheduling in distributed production systems. The paper examines the features of complex production systems, including the uncertainty characteristic of real production systems, the multi-agent nature of the interaction of elements and the multiplicity of target functions, as well as their impact on the parameters of the production schedule. The paper provides an analysis of scientific literature in the field of distributed production system modeling based on scientific publications presented in Scopus and RSCI. Based on the results of the analysis of international experience in modeling distributed production systems, the structural elements of distributed production systems are described in the context of the task of scheduling. The result of the work is an ontological model of the scheduling process in distributed production systems as a set of strategic interactions in the terminology of game theory and multi-agent systems. To describe game interactions, a set of formalized strategies and agent payoffs in a top-down pattern of game interaction is provided, and a description in terms of BDI models of agents of a multi-agent system involved in the production schedule is also provided. An ontological model of the communication network of the structural elements of distributed production systems is also given in the context of the task of scheduling. The results obtained are the basis for the development of a decision support system for scheduling in distributed production systems.

Keywords: production schedule, complex systems, distributed production systems, multi-agent approach, game theory.

Citation: Burlutskaya, Z., Sharko, P., Pospelov, K., Gintciak, A., 2025. Definition and formalization of the relationships of the structural elements of distributed production systems in the context of the task of forming a schedule. *Sustainable Development and Engineering Economics* 3, 3. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.3>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Burlutskaya Z., Sharko P., Pospelov K., Gintciak A., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

Современные методы производственного планирования не позволяют учесть мультиагентную природу взаимодействий, присущую реальным процессам в распределенных производственных системах, выражающуюся во множественности целей и возможностей участников. Это приводит к снижению эффективности решений, поскольку глобальные стратегические ориентиры системы не всегда согласуются с интересами отдельных агентов, что затрудняет устойчивую реализацию полученных планов. В связи с этим возникает необходимость разработки подходов, учитывающих как глобальные цели системы, так и локальные целевые функции ее элементов. Такой подход должен позволять формировать расписания, устойчивые к неопределенности и сбалансированные по интересам участников, что обеспечивает согласованное взаимодействие в рамках всей производственной системы. Данная работа посвящена формализации задачи составления расписания в распределенных производственных системах. В исследовании рассматриваются ключевые особенности таких систем: неопределенность, мультиагентный характер взаимодействия и множественность целевых функций, а также их влияние на параметры расписания. На основании анализа опыта разработки мультиагентных систем (МАС) и применения методов теории игр для решения задачи составления расписаний предложено описание структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания в терминах теории игр и МАС. Представленные онтологическая модель коммуникационной сети МАС, формализация агентов в терминах BDI и теоретико-игрового подхода, онтологическая модель процесса формирования расписания позволяют реализовать цифровую модель системы теоретико-игровых агентов модели распределенной производственной системы в контексте задачи формирования расписания. Теоретико-игровая формализация представлена для различных типов игр, что позволяет отразить многообразие коммуникативных стратегий участников моделируемой системы. Решение представлено для восходящего и нисходящего паттернов игрового взаимодействия, отражающих различные подходы к управлению распределенными производственными системами. Модель позволяет учесть особенности управления распределенной системой, имеющей черты иерархической. Разработанная модель может служить теоретической основой для разработки системы поддержки принятия решений при планировании расписания в распределенных производственных системах.

2. Материалы и методы

Представленное исследование находится на пересечении предметных областей: производственного планирования и теории МАС. Рассмотрение МАС также связано с использованием математического аппарата теории игр, поскольку именно этот раздел математики формализует стратегические взаимодействия нескольких сторон. Для обзора современного состояния исследований в этой области целесообразно обобщить имеющиеся в научной среде сведения как о производственном планировании и МАС по отдельности, так и об исследованиях, объединяющих эти предметные области.

Проблематика исследования операций в целом и составления производственных расписаний в частности для научного дискурса новой не является. Существует значительное количество работ, рассматривающих задачи планирования производств как в теоретическом, так и в прикладном ракурсах. Примерами базовых фундаментальных исследований по теме могут служить работы по исследованию операций (Taha, 2005; Lapshenkov, 2010) и ряда

других отечественных и зарубежных исследовательских групп (Hooker, 2006; Massart et al., 2003). Существуют отдельные фундаментальные труды, в том числе и в ограниченной предметной области теории расписаний: речь идет о работах А.А. Лазарева и Е.Р. Гафарова (Lazarev et al., 2011), Д.Р. Кирана (Kiran, 2019) и других.

Помимо фундаментальных работ, обобщающих и систематизирующих математические инструменты и методы решения типовых задач производственного планирования, существует значительное количество исследований, охватывающих отдельные практические аспекты применения этих инструментов и методов, в частности, в различных видах производственных систем. Подобные работы касаются таких крупных разделов теории расписаний, как транспортные расписания (Lazarev et al., 2011; Guzha et al., 2019) и производственные расписания (назначения) (Zagidullin, 2020; Zakharchenkov et al., 2018). Подобные исследования ведутся как в России (Rodionov & Alfer'yev, 2020; Karimov, 2021), так и за рубежом (Hartmann & Briskorn, 2022; Xiong et al., 2022).

В ходе исследования современного состояния предметной области были выделены три кластера публикаций по теме, а именно:

– фундаментальные и/или формально теоретические работы, нацеленные на развитие математических и алгоритмических средств решения типовых (общих) задач, например (Таха, 2005; Lazarev et al., 2012; Taillard, 1993) и др.;

– концептуальные работы, в которых излагается идеология решения отдельных задач или групп задач без практических примеров таких решений и детального описания инструментов и методов, например (Zakharchenkov et al., 2018; Karimov, 2021) и др.;

– узкоспециализированные практико-ориентированные работы, предлагающие инструменты и методы для решения конкретных частных задач предметной области, например (Lazarev et al., 2012; Guzha et al., 2019; Zagidullin, 2020) и др.

Проблематика задач производственного планирования – и, в частности, задач формирования производственного расписания – заключается в многоуровневом характере сопутствующих решению проблем. Так, например, исследователям и практикам при решении задач в данной предметной области необходимо пройти по пути последовательного разрешения нескольких организационно-технических проблем.

Организационная проблема решения задач производственного планирования в парадигме теории игр состоит в практической трудности выделения агентов, формализации их требований и определения потребности в учете тех или иных сторон взаимодействия как агентов. Подобные задачи ставятся в исследованиях и решаются в том числе в контексте задач производственного планирования (Shorikov et al., 2023).

Алгоритмическая проблема решения подобных задач состоит в сложности недвусмысленной формализации целевых функций агентов, равно как и в формализации их реальных взаимодействий. Количество, гетерогенность и разнородная степень влияния организационных ограничений также существенно усложняют процессы формализации производственных задач, что не позволяет применять к ним математические методы и инструменты без специфической адаптации данных и средств решения под цели конкретного расчета. Исследования, посвященные этой теме, также ведутся (Zeng et al., 2009; Volkova et al., 2016; Grivachev & Sazonov, 2016). Наконец, математическая проблема состоит в принципиальной сложности

решения многих задач построения расписаний и схожих задач. Некоторые задачи данной предметной области классифицируются как NP-трудные задачи, т.е. задачи с недетерминированной полиномиальной трудностью по времени. Такие задачи могут не иметь устойчивого решения или требовать для разрешения существенных временных затрат и вычислительных мощностей. Это требует применения сложных алгоритмов для получения удовлетворительных решений (Garey & Johnson, 1979; Moukrim et al., 2015). Таким образом, решение задач в заявленной предметной области сопряжено с множеством локальных организационно-технических проблем, решение которых не всегда формализовано в достаточной степени, чтобы применение универсальных инструментов и методов оказалось эффективным.

Большинство задач производственного планирования сводится к нескольким основным видам типовых задач, решения которых алгоритмически хорошо проработаны. Существуют традиционные методы для решения, в частности, задач упаковки (Lutsan & Nuzhnov, 2014), задач о назначениях (Mingozzi et al., 1998), частных их постановок, например RCPSP-задач (Resource-Constrained Project Scheduling Problems) (Hartmann & Briskorn, 2022; Ding et al., 2023), задач коммивояжера (Boroznov, 2009) и других задач, в той или иной степени соответствующих практическим задачам производственного планирования. Существующие методы гарантируют возможность нахождения решений математических постановок таких задач при их существовании в рамках таких постановок, однако вопросы формализации все еще остаются существенными, поскольку без их решения невозможно приложить конкретное эффективное алгоритма к рассматриваемой производственной системе.

Существуют интегрированные интеллектуальные системы решения задач планирования производства, в частности ERP-системы (Enterprise Resource Planning Systems), MES-системы (Manufacturing Execution Systems) и APS-системы (Advanced Planning and Scheduling Systems) (Gromov & Tarasov, 2011). Подобные системы решают широкий перечень технических задач, таких как активация производственных мощностей на основе пооперационного планирования производства, отслеживание состояния производственных мощностей, сбор информации от систем автоматизации производственного процесса, датчиков, оборудования, персонала, программных систем, отслеживание и контроль параметров качества и пр. Однако такие инструменты в первую очередь основаны на математических подходах и алгоритмах, использующихся в задачах оптимизации, квазиоптимизации или составления удовлетворительных производственных планов с учетом заданных ограничений. Подобные системы, как правило, не учитывают множество целевых функций заинтересованных агентов, что сохраняет при их применении ключевые организационные сложности: установление расписания, соответствующего формально определенной целевой функции, с их помощью возможно, но собственно формальное определение целевой функции остается задачей вне контура таких систем.

Кроме того, при рассмотрении полученных решений может быть полезно сопоставить достигнутые при применении традиционных методов и основанные на мультиагентности системы результаты – для определения фактического влияния мультиагентности на систему и выработки лучших организационных решений. Исходя из представленных выше сведений об исследовании операций и теории расписаний, их практических методах, исследованиях в области и реализованных средствах работы с задачами в описываемой предметной области, можно заключить, что изучение проблем производственного планирования сейчас активно продолжается как в России, так и за рубежом. При этом, несмотря на большой объем

различных работ, посвященных проблемам производств, некоторые вопросы все еще остаются актуальными для детального изучения. В частности, имеет смысл выработка способов оценки влияния мультиагентности на систему при различных конфигурациях целевых функций, собственных агентам, и их взаимоотношений. Также имеет смысл проработка комплекса организационно-технических проблем, связанных с формализацией и решением производственных задач.

Поскольку одним из ключевых направлений исследования является применение мультиагентного подхода для решения задач производственного планирования, необходимо проанализировать современные исследования в этой области, а также практики применения теории МАС в целом. Следует отметить, что теория МАС и практики ее применения для решения различных задач разрабатываются уже несколько десятилетий. При этом данный подход не получил широкого индустриального распространения, несмотря на то что регулярно включается в список наиболее перспективных направлений исследований. Данный парадокс вызван несколькими причинами (Chernyshev, 2023; Gorodetsky et al, 2017):

- мультиагентные модели сложны как с точки зрения математической формализации, так и с точки зрения программной реализации, поэтому зачастую используются исключительно для концептуального описания поставленных задач;
- не существует общепринятой терминологической базы в контексте мультиагентного подхода, что затрудняет обмен результатами исследований внутри научного сообщества, а также между разработчиками программных решений;
- интерес к индустриальному внедрению МАС с момента их появления значительно снизился за счет технологического развития и появления альтернативных инструментов, обладающих узким назначением и относительной легкостью программной реализации;
- позиционирование мультиагентного подхода в качестве универсального инструмента на данный момент не реализовано на практике, что повлияло на развитие отдельных практик применения подхода для узкоспециализированных задач.

Однако мультиагентный подход остается перспективным инструментом решения сложных, многокритериальных и плохо формализуемых задач. МАС представляется как совокупность интеллектуальных агентов, среды и организационной структуры (Wooldridge, 2009; Sharko & Burlutskaya, 2025). При этом структура убеждений, желаний, планов, организационная структура и структура среды МАС могут быть представлены онтологией (Boissier et al., 2020). Ранее была построена инвариантная онтология мультиагентных взаимодействий в сложной производственной системе (Sharko & Burlutskaya, 2025). За основу структуры агента зачастую принимается BDI-модель, выбор обусловлен ее популярностью, многообразием программных инструментов для реализации на ее основе архитектуры когнитивного агента и обширной теоретической базой по применению данной модели в построении МАС, в том числе проектируемых на основе онтологий (Wooldridge, 2009; Boissier et al., 2020; Hadzic et al., 2009; Calegari et al., 2021; Drobnyakovic et al., 2022; May et al., 2022; Lim et al. 2023). Среди успешных практик применения мультиагентного подхода можно выделить задачи по извлечению знаний, распознаванию образов, управлению ресурсами (Gorodetsky et al., 2019; Skobelev, 2011) и непосредственно составлению расписаний (Gorodetsky et al., 2017; Gorodetsky et al., 2001). Также интересны практики применения мультиагентного подхода для управления организационными системами и, в частности, конфликтными ситуациями (Magomedov & Chernyshev, 2022; Shveczov et al., 2022). Таким образом, развитие исследований МАС может

быть достигнуто за счет сужения сфер применения на основании опыта успешных практик, а также разработки формализованных инструментов реализации частных мультиагентных моделей (Chernyshev, 2023; Gorodetsky et al., 2017; Vladimirov, 2014). Выполнялись как фундаментальные исследования основ МАС, так и практические разработки отдельных инструментов в области транспортной логистики, включая составление расписаний (Granichin et al., 2013; Gorodetsky et al., 2012; Skobelev, 2011) и управление инцидентами (Gorodetsky et al., 2008). Примечательно, что в разное время в данных научных школах реализовывались проекты по разработке методик и языков создания МАС (Tushkanova et al., 2015; Gorodetsky et al., 2015). Вопросы формирования расписания с использованием МАС были затронуты в исследованиях упомянутых авторов, но не получили развития в виде формализованных методов и моделей. При этом актуальность и перспективность подобных исследований упомянута сразу в нескольких работах (Gorodetsky et al., 2017; Gorodetsky et al., 2001).

Одним из достоинств мультиагентного подхода являются возможность имитации децентрализованности взаимодействий и множественности агентов и, как следствие, определение качественно новых эмерджентных свойств системы (Novikov, 2016). Отсюда рождается преимущество применения МАС для задачи составления расписаний, в том числе при оперативном планировании. МАС по сравнению с традиционными методами более гибки, упрощают корректировку расписаний при оперативном планировании и позволяют получать решения, более устойчивые к нарушениям в расписании (Shukla et al., 2021). Помимо уточнения решений, МАС более производительны, что ускоряет процесс формирования расписаний и делает возможным использование подхода при оперативном управлении. Набор требуемых для использования мультиагентной модели данных различается в реализациях. Можно утверждать, что данные, необходимые для описания отличительных особенностей агентов, могут быть подготовлены предварительно и в процессе использования инструмента могут обновляться только на основании подробной и достаточно точно известной информации. Информация для обновления моделей как субъектов, так и объектов системы может быть получена из промежуточных результатов работы системы либо определена путем сбора данных с датчиков, что и используется в реализациях современных МАС предприятий (Gorodetsky et al., 2017; Shpilevoy et al., 2013; Siatras et al., 2023).

3. Результаты

3.1. Теоретико-игровая формализация связей структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания

Задача построения производственного расписания в общем виде может быть формализована в терминах теории игр. Типовое теоретико-игровое взаимодействие может быть впоследствии использовано для формализации конкретных задач управления.

В рамках формализуемого взаимодействия участвуют три группы агентов: агенты-производители, агенты обеспечения и агенты ресурсных пулов.

Теоретико-игровые агенты-производители – представляют собой отражения сотрудников и руководителей производственных подразделений системы. Целевые функции в общем сводятся к выполнению и/или перевыполнению производственного плана либо извлечению максимального дохода от реализации, но в частностях могут отличаться.

Теоретико-игровые агенты обеспечения – представляют собой отражения сотрудников и руководителей подразделений системы, занимающихся обеспечением производства. Целевые функции в общем сводятся к минимизации издержек и максимально возможной непрерывности производственного плана, но в частностях могут отличаться.

Теоретико-игровые агенты ресурсных пулов – представляют собой, как правило, набор фиктивных агентов, отвечающих за сохранение общих ресурсных пулов: необходимы для того, чтобы действия агентов других видов не приводили к перепотреблению ресурсов. Целевые функции всегда сводятся к максимизации буфера ресурсного пула, за который отвечает агент.

Агенты Заказчика, Поставщика, Предприятия в общей модели не представлены – они не участвуют в составлении производственного расписания, но задают для него следующие условия и ограничения (табл. 1).

Таблица 1. Ограничения, вводимые агентами Заказчиком, Поставщиком, Предприятием при решении задачи формирования расписания в распределенных производственных системах

Агент	Условия и ограничения для игрового взаимодействия
Заказчик	$\max(t_{\text{кон}}^i) \leq T_{\text{треб}}$ – сроки выполнения всех работ не могут превышать некоторый требуемый предел.
Поставщик	$t_{\text{нач}}^i \geq \tau$ – сроки возможного начала i -й работы не могут быть меньше, чем некоторый базовый срок (срок поставки материалов);
Предприятие	W – задает множество всех работ; $t_{\text{нач}}^i \geq \max(t_{\text{кон}}^j \in J: \forall t^j \in J \rightarrow t^i)$ – задает нормативную последовательность некоторых работ (работа не может быть начата прежде, чем не закончатся все предшествующие ей работы).

Агенты работников (сотрудников) предприятия репрезентованы в рамках частных вариаций агентов-производителей, агентов обеспечения, агентов ресурсных пулов.

Среди агентов, входящих в игровое взаимодействие, возможна иерархичность. Каждый агент-производитель или агент обеспечения представлен двумя уровнями иерархии: руководство и исполнение. В общем случае можно считать, что и в одном, и в другом случае руководство и исполнения представлены единственными агентами. В более сложных частных вариациях модели возможно расширение, при котором агентный состав взаимодействия будет расширен (например, для учета ограниченной рациональности отдельных лиц, принимающих решения, или исполнителей работ). Таким образом, формируется типовой набор агентов игрового взаимодействия (табл. 2).

Таблица 2. Типовой набор агентов игрового взаимодействия при решении задачи формирования расписания в распределенных производственных системах

	Агент Производитель	Агент Обеспечение	Агент ресурсного пула
Руководство	Агент Производитель-руководство	Агент Обеспечение-руководство	Множество агентов ресурсных пулов (по одному на каждый пул)
Исполнение	Агент Производитель-исполнение	Агент Обеспечение-исполнение	

Игра, представляющая процесс составления производственного расписания, в любом случае является игрой с множественными участниками, итеративной игрой с ненулевой суммой. Кооперативный характер игры не гарантируется. Рассмотренный набор игр – кооперативная, конкурентная последовательная и конкурентная одновременная – позволяют отразить особенности коммуникативных стратегий агентов, давая возможность представить в модели агентов со склонностью к кооперации, конкуренции, коопетиции.

Специфика игрового взаимодействия (наборы стратегий, наборы выигрышей агентов) будет зависеть от паттерна реализации игры. Вводится два основных паттерна игрового взаимодействия: восходящий (инициативный) и нисходящий (директивный). Эти паттерны могут быть впоследствии дополнены более сложными конструкциями. Рассмотрим восходящий (инициативный) паттерн игрового взаимодействия (табл. 3).

Заказчик может выставить требование по сроку готовности всех работ. Поставщик(и) может (могут) выставить ограничения по срокам поставки материалов. Предприятие сообщает участникам игрового взаимодействия множество работ и нормативные последовательности работ. Агенты Производитель-исполнение и Обеспечение-исполнение начинают совместно составлять расписание выполнения работ с учетом строгих ограничений и собственных целевых функций:

- либо построение выполняется в формате кооперативной игры;
- либо построение выполняется в виде конкурентной игры, где в итоге принимается равновесное решение.

После первичного составления расписания выполняется проверка расписания агентами ресурсных пулов. В случае недостижения критериев качества расписания агент соответствующего ресурсного пула возвращает предупреждение. Далее агенты уровня исполнения могут принять решение о пересмотре расписания (опционально).

Составленное расписание вместе с ограничениями, диктуемыми агентами уровня исполнения, эскалируется на уровень руководства: агенты Производитель-руководство и Обеспечение-руководство совместно вырабатывают возможные правки в расписание соответственно своим целевым функциям (одной из стратегий профилей агентов является оставление расписания без изменений):

- либо внесение правок выполняется в формате кооперативной игры;
- либо внесение правок выполняется в виде конкурентной игры, где в итоге принимается равновесное решение.

После внесения правок в расписание выполняется проверка расписания агентами ресурсных пулов. В случае недостижения критериев качества расписания агент соответствующего ресурсного пула возвращает предупреждение. Далее агенты уровня руководство могут принять решение о пересмотре расписания (опционально). Игра итеративно повторяется.

Таблица 3. Набор стратегий и выигрышей агентов при восходящем (инициативном) паттерне игрового взаимодействия

Агент	Набор стратегий	Набор выигрышей
<i>Кооперативная игра</i>		
Производство-исполнение	$S_{исп} = \{\varsigma_i, \rho_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$P_{исп} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Обеспечение-исполнение		
Производство-руководство	$S_{рук} = \{\varsigma_i\}$ – набор возможных к построению с учетом ограничений расписаний	$P_{рук} = \{\zeta_i\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Обеспечение-руководство		
Ресурсный пул	$S_{рп} = \{0; 1\}$ – непередача/передача сообщения о необходимости пересмотра расписания	$P_{рп} = \{\beta_i\}$ – реальный/ожидаемый после пересмотра буфер ресурса
<i>Конкурентивная последовательная игра</i>		
Доминирующий агент Исполнение	$\hat{S}_{ди} = \{\varsigma_i, \rho_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$\hat{P}_{ди} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Доминируемый агент Исполнение	$\check{S}_{ди} = \{\varsigma_i, \rho'_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними дополнительных ограничений для корректировок	$\check{P}_{ди} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi'_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с дополняющими ограничениями)
Доминирующий агент Руководство	$\hat{S}_{др} = \{\varsigma_i, \rho''_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними дополнительных ограничений для корректировок	$\hat{P}_{др} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi''_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с дополняющими ограничениями)

Агент	Набор стратегий	Набор выигрышей
Доминируемый агент Руководство	$\check{S}_{др} = \{\zeta_i\}$ – набор возможных к построению расписаний	$\check{P}_{др} = \{\zeta_i\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Ресурсный пул	$S_{рп} = \{0; 1\}$ – непередача/передача сообщения о необходимости пересмотра расписания	$P_{рп} = \{\beta_i\}$ – реальный/ожидаемый после пересмотра буфер ресурса
Конкурентная одновременная игра		
Производство-исполнение	$S_{пи} = \{\zeta_i, \rho_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$P_{пи} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Обеспечение-исполнение	$S_{ои} = \{\zeta_j, \rho_j\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$P_{ои} = \{\varepsilon_j: f(\zeta_j, \xi_j)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Производство-руководство	$S_{пр} = \{\zeta_m\}$ – набор возможных к построению с учетом ограничений расписаний	$P_{пр} = \{\zeta_m\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Обеспечение-руководство	$S_{ор} = \{\zeta_k\}$ – набор возможных к построению с учетом ограничений расписаний	$P_{ор} = \{\zeta_k\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Ресурсный пул	$S_{рп} = \{0; 1\}$ – непередача/передача сообщения о необходимости пересмотра расписания	$P_{рп} = \{\beta_i\}$ – реальный/ожидаемый после пересмотра буфер ресурса

Стоит заметить, что понятия «доминирующий» и «доминируемый» используются для обозначения приоритета в постановке ограничений. Доминирующий агент имеет более широкий перечень опций в построении расписания.

Рассмотрим нисходящий (директивный) паттерн игрового взаимодействия (табл. 4). Заказчик может выставить требование по сроку готовности всех работ. Поставщик(и) может (могут) выставить ограничения по срокам поставки материалов. Предприятие сообщает участникам игрового взаимодействия множество работ и нормативные последовательности работ. Агенты Производитель-руководство и Обеспечение-руководство начинают совместно составлять расписание выполнения работ с учетом строгих ограничений и собственных целевых функций:

- либо построение выполняется в формате кооперативной игры;

– либо построение выполняется в виде конкурентной игры, где в итоге принимается равновесное решение.

После первичного составления расписания выполняется проверка расписания агентами ресурсных пулов. В случае недостижения критериев качества расписания агент соответствующего ресурсного пула возвращает предупреждение. Далее агенты уровня Руководство могут принять решение о пересмотре расписания (опционально).

Составленное расписание вместе с ограничениями, диктуемыми агентами уровня руководство, деэскалируется на уровень исполнения: агенты Производитель-исполнение и Обеспечение-исполнение совместно вырабатывают возможные правки в расписание сообразно своим целевым функциям (одной из стратегий профилей агентов является оставление расписания без изменений):

- либо внесение правок выполняется в формате кооперативной игры;
- либо внесение правок выполняется в виде конкурентной игры, где в итоге принимается равновесное решение.

После внесения правок в расписание выполняется проверка расписания агентами ресурсных пулов. В случае недостижения критериев качества расписания агент соответствующего ресурсного пула возвращает предупреждение. Далее агенты уровня исполнение могут принять решение о пересмотре расписания (опционально). Игра итеративно повторяется.

Таблица 4. Набор стратегий и выигрышей агентов при нисходящем (директивном) паттерне игрового взаимодействия

Агент	Набор стратегий	Набор выигрышей
<i>Кооперативная игра</i>		
Производство-исполнение	$S_{исп} = \{\zeta_i\}$ – набор возможных к построению с учетом ограничений расписаний	$P_{исп} = \{\zeta_i\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Обеспечение-исполнение		
Производство-руководство	$S_{рук} = \{\zeta_i, \rho_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$P_{рук} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Обеспечение-руководство		
Ресурсный пул	$S_{рп} = \{0; 1\}$ – непередача/передача сообщения о необходимости пересмотра расписания	$P_{рп} = \{\beta_i\}$ – реальный/ожидаемый после пересмотра буфер ресурса
<i>Конкурентная последовательная игра</i>		
Доминирующий агент Исполнение	$\hat{S}_{ди} = \{\zeta_i, \rho''_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и	$\hat{P}_{ди} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi''_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий

Агент	Набор стратегий	Набор выигрышей
	связанных с ними дополнительных ограничений для корректировок	(совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с дополняющими ограничениями)
Доминируемый агент Исполнение	$\check{S}_{ди} = \{\zeta_i\}$ – набор возможных к построению расписаний	$\check{P}_{ди} = \{\zeta_i\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Доминирующий агент Руководство	$\hat{S}_{др} = \{\zeta_i, \rho_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$\hat{P}_{др} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Доминирующий агент Руководство	$\check{S}_{др} = \{\zeta_i, \rho'_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними дополнительных ограничений для корректировок	$\check{P}_{др} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi'_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с дополняющими ограничениями)
Ресурсный пул	$S_{рп} = \{0; 1\}$ – непередача/передача сообщения о необходимости пересмотра расписания	$P_{рп} = \{\beta_i\}$ – реальный/ожидаемый после пересмотра буфер ресурса

Конкурентная одновременная игра

Производство-исполнение	$S_{пи} = \{\zeta_m\}$ – набор возможных к построению с учетом ограничений расписаний	$P_{пи} = \{\zeta_m\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Обеспечение-исполнение	$S_{ои} = \{\zeta_k\}$ – набор возможных к построению с учетом ограничений расписаний	$P_{ои} = \{\zeta_k\}$ – набор оценок соответствия расписания целевой функции
Производство-руководство	$S_{пр} = \{\zeta_i, \rho_i\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$P_{пр} = \{\varepsilon_i: f(\zeta_i, \xi_i)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)
Обеспечение-руководство	$S_{ор} = \{\zeta_j, \rho_j\}$ – набор возможных к построению расписаний и связанных с ними ограничений для корректировок	$P_{ор} = \{\varepsilon_j: f(\zeta_j, \xi_j)\}$ – набор оценок эффективности стратегий (совокупная оценка соответствия расписания целевой функции и риска, связанного с ограничениями)

Агент	Набор стратегий	Набор выигрышей
Ресурсный пул	$S_{pp} = \{0; 1\}$ – непередача/передача сообщения о необходимости пересмотра расписания	$P_{pp} = \{\beta_i\}$ – реальный/ожидаемый после пересмотра буфер ресурса

Стоит заметить, что понятия «доминирующий» и «доминируемый» используются для обозначения приоритета в постановке ограничений. Доминирующий агент имеет более широкий перечень опций в построении расписания.

В ряде случаев представленные положения формализации модели могут нуждаться в дополнении для успешной имплементации модели в процессы управления. Для этого делается ряд замечаний:

1. В случае наличия конкуренции на одном уровне иерархии и в одной агентной плоскости модели (например, при наличии нескольких производственных филиалов/подразделений, имеющих независимые требования к результативности и общие ресурсные пулы) возможно размножение агентов на этом уровне – т.е. допускается существование нескольких идентичных структурно агентов с различающимися в частности целевыми функциями (например, имеется ряд агентов, стремящихся к выравниванию загрузки на собственных предприятиях: в таком случае целевые функции будут структурно сходны, но будут касаться различных исполнителей производственного расписания).

2. В случае наличия факторов, не позволяющих частным сотрудникам принимать рациональные решения при составлении производственного расписания, возможно размножение агентов соответствующего иерархического уровня и соответствующей агентной плоскости – т.е. допускается существование нескольких агентов с различающимися в частности целевыми функциями.

В обоих случаях логика построения модели не меняется. На каждом из описанных выше этапов игрового взаимодействия увеличивается число игроков, что затрудняет поиск равновесного решения (вплоть до невозможности выделения конкретного равновесного решения), однако алгоритмически процесс игры остается неизменным.

Представленная теоретико-игровая формализация структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания может быть реализована с использованием различных подходов к цифровому моделированию. Для рассматриваемой задачи, требующей отражения индивидуальных целей и возможностей участников, следует использовать подход, позволяющий реализовывать структурные элементы как отдельные сущности с личными убеждениями, целями, стратегиями. Данные особенности моделируемых систем позволяет отражать мультиагентный подход.

3.2. Онтологические модели мультиагентных взаимодействий структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания

Реализация цифровой модели распределенной производственной системы может быть выполнена на базе мультиагентного подхода. При формализации задачи в терминах мультиагентного подхода необходимо определить структуру интеллектуальных агентов, среду и

организационную структуру системы. При формализации распределенной производственной системы в контексте задачи формирования расписания в терминах МАС необходимо описать теоретико-игровых агентов, принимающих решения при формировании расписания и коммуникативную сеть системы. Среда системы в общем случае определена не будет, так как для ее задания требуется дополнительная информация об объектах, необходимых агентам для принятия решений. Нормы для агентов обозначенных типов введены в рамках коммуникационной структуры системы и не могут быть уточнены без дополнения постановки задачи. Определение протоколов является технической задачей, при решении задачи формирования расписания в распределенной производственной системе могут быть использованы стандартные протоколы. Описание интеллектуальных агентов представлено в терминах BDI, коммуникационная сеть представлена онтологической моделью.

Онтологическая модель коммуникационной сети структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания (рис. 1) построена на основе представленного в рамках теоретико-игровой формализации описания последовательности действий агентов. Заказчик, Предприятие, Поставщик представлены в коммуникационной сети, хоть и не являются теоретико-игровыми агентами. Представление их в рамках онтологии обусловлено необходимостью отражения влияния данных структурных элементов на процесс формирования производственного расписания путем определения ограничений системы. Подход к реализации данных структурных элементов в рамках МАС зависит от реализуемого ими подхода к определению ограничений системы – в зависимости от требуемой степени автономности и способности к рассуждению данные элементы могут быть реализованы и как функции, и как агенты, и как интеллектуальные агенты. Рассматривая наиболее общий случай, в список агентов МАС мы их не включаем, но отмечаем, что реализация их при построении МАС как интеллектуальных агентов допустима – в этом случае в коммуникационную сеть они должны быть включены так, как отмечено на рис. 1.

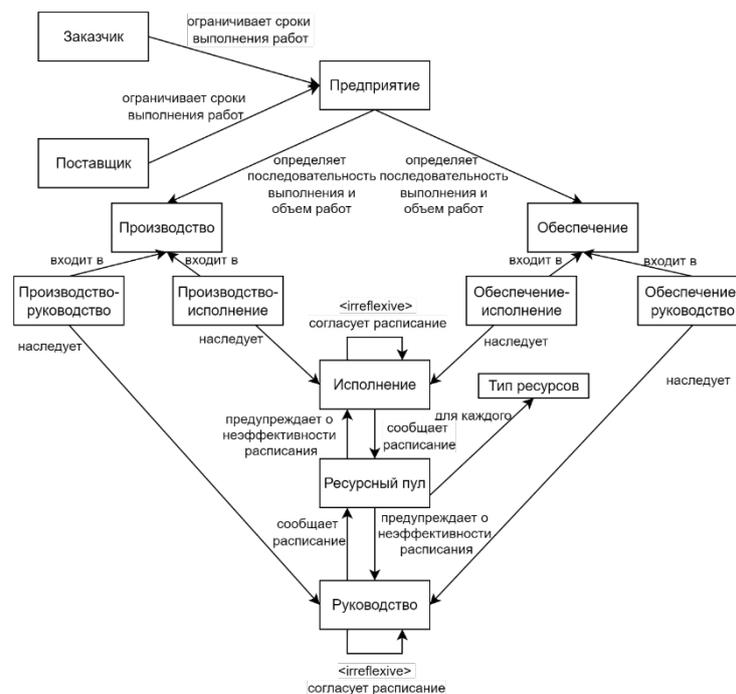


Рисунок 1. Онтологическая модель коммуникационной сети структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания

Как и в теоретико-игровой формализации, производство и обеспечение представлены агентами Производство-руководство и Производство-исполнение, Обеспечение-руководство и Обеспечение-исполнение соответственно. Данные агенты реализованы в соответствии с агентами Исполнение и Руководство, отличаясь в рамках решаемой задачи целевыми функциями, типами ограничений и типами результатов труда. Процесс формирования расписания, однако, для агентов-наследников Руководства не отличается, как и для агентов-наследников Обеспечения, и потому описан едино (рис. 2). Агенты ресурсного пула представлены для каждого типа ресурсов системы. Их поведение также не зависит от типов ресурсов, различаются агенты целевыми функциями и типами ресурсов, данные о которых им необходимы. Агенты Производство-руководство и Обеспечение-руководство согласуют расписания в соответствии с описанными в рамках теоретико-игровой формализации подходами, аналогично согласуют расписание агенты Обеспечение-руководство и Обеспечение-исполнение. После согласования агенты передают согласованные расписания ресурсным пулам. Агенты ресурсного пула после оценки сообщают ее Исполнению и Руководству. Для описания протекающих при формировании расписания процессов требуется формализация агентов в терминах BDI (табл. 5).

Таблица 5 Описание в терминах BDI агентов MAC для формирования расписания в распределенной производственной системе

Агент	Убеждения	Желания	Доступные действия
Производство-исполнение	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограничения сроков производства; 2. Последовательность работ по производству; 3. Объем продукта, который должен быть произведен; 4. Объем произведенного продукта; 5. Расписание руководства; 6. Расписание исполнения; 7. Выбранная стратегия для согласования; 8. Согласованность стратегии; 9. Оценка расписания ресурсным пулом; 10. Тип игры; 11. Доступные стратегии (варианты расписаний). 	<p>Выполнение и/или перевыполнение производственного плана либо извлечение максимального дохода от реализации</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Составление доступных стратегий (варианты расписаний); 2. Оценка эффективности расписания; 3. Сообщение расписания ресурсному пулу; 4. Сообщение игроку выбранной стратегии.
Обеспечение-исполнение	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограничения сроков выполнения работ; 2. Последовательность работ; 3. Объем работ, который должен быть выполнен; 4. Издержки на проведение работ; 5. Расписание руководства; 6. Расписание исполнения; 	<p>Минимизация издержек и максимально возможной непрерывности производственного плана</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Составление доступных стратегий (варианты расписаний); 2. Оценка эффективности расписания; 3. Сообщение расписания ресурсному пулу;

Агент	Убеждения	Желания	Доступные действия
	<ul style="list-style-type: none"> 7. Выбранная стратегия для согласования; 8. Согласованность стратегии; 9. Оценка расписания ресурсным пулом; 10. Тип игры; 11. Доступные стратегии (варианты расписаний). 		<ul style="list-style-type: none"> 4. Сообщение игроку выбранной стратегии.
Производство-руководство	<ul style="list-style-type: none"> 1. Ограничения сроков производства; 2. Последовательность работ по производству; 3. Объем продукта, который должен быть произведен; 4. Объем произведенного продукта; 5. Доступные стратегии; 6. Расписание руководства; 7. Расписание исполнения; Выбранная стратегия для согласования; 8. Согласованность стратегии; 9. Оценка расписания ресурсным пулом; 10. Тип игры; 11. Доступные стратегии (варианты расписаний). 	<ul style="list-style-type: none"> Выполнение и/или перевыполнение производственного плана либо извлечение максимального дохода от реализации 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Составление доступных стратегий (варианты расписаний); 2. Оценка эффективности расписания; 3. Сообщение расписания ресурсному пулу; 4. Сообщение игроку выбранной стратегии.
Обеспечение-руководство	<ul style="list-style-type: none"> 1. Ограничения сроков выполнения работ; 2. Последовательность работ; 3. Объем работ, который должен быть выполнен; 4. Издержки на проведение работ; 5. Доступные стратегии; 6. Расписание руководства; 7. Расписание исполнения; Выбранная стратегия для согласования; 8. Согласованность стратегии; 9. Оценка расписания ресурсным пулом; 10. Тип игры; 11. Доступные стратегии (варианты расписаний). 	<ul style="list-style-type: none"> Минимизация издержек и максимально возможной непрерывности производственного плана 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Составление доступных стратегий (варианты расписаний); 2. Оценка эффективности расписания; 3. Сообщение расписания ресурсному пулу; 4. Сообщение игроку выбранной стратегии.

Агент	Убеждения	Желания	Доступные действия
Ресурсный пул	<ol style="list-style-type: none"> 1. Буфер доступных ресурсов контролируемого агентом типа; 2. Расписание руководства; 3. Расписание исполнения; 4. Оценка расписания. 	Максимизации буфера ресурсного пула, за который отвечает агент	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка допустимости расписания; 2. Сообщение о допустимости расписания.

В табл. 2 описаны убеждения и желания агентов мультиагентной модели распределенной производственной системы в контексте задачи формирования расписания. Описание дополнено возможными действиями агентов, что может быть учтено при реализации МАС путем введения планов. Желания определены в соответствии с введенными в рамках теоретико-игровой формализации целями агентов. Убеждения, представленные в табл. 2, отражают ограничения, налагаемые на агентов, доступные теоретико-игровые стратегии агентов, расписания агентов, дополнительные данные для коммуникации агентов, необходимые для моделирования игр. Действия агентов включают составление расписаний, оценку эффективности переданных от ресурсных пулов расписаний и действия, позволяющие организовать коммуникацию агентов. В соответствии с приведенными в табл. 3 действиями агентов, а также теоретико-игровой формализацией разработана онтологическая модель процесса формирования расписания в распределенной производственной системе.

В рамках МАС не может быть определен единый процесс формирования расписания – данная особенность необходима при построении систем, учитывающих индивидуальные цели и возможности участников. На рис. 2 представлена онтологическая модель процесса формирования расписания в распределенной производственной системе, декомпозированная на модели процессов формирования расписания, реализуемых типовыми агентами системы. В онтологической модели отражена специфика поведения агентов в зависимости от паттерна игрового взаимодействия.

Представленные онтологические модели позволяют реализовать мультиагентную модель распределенной производственной системы в контексте задачи формирования расписания, определив коммуникационную сеть в соответствии с разработанной онтологией и структуру агентов в соответствии с предложенным описанием убеждений, желаний, и планов, состоящих из описанных действий агентов, объединенных представленной онтологией процесса. Представленная формализация в терминах МАС позволяет реализовать предложенный теоретико-игровой подход.



Рисунок 2. Онтологическая модель процесса формирования расписания в распределенной производственной системе

4. Обсуждение

Методы теории игр широко применяются при построении МАС. Инструменты, использующие возможности мультиагентного подхода и теории игр, применяются при решении задач различных отраслей: робототехники (Korivand, 2024), энерготехнологий (Lin, 2024; Park, 2022; Xi, 2015), управления в чрезвычайных ситуациях (Liu, 2022), аэрокосмической отрасли (Zhao, 2024). Разрабатываются и универсальные решения (Shankar, 2023; Li, 2022). В научном дискурсе представлены как решения, основанные на MARL (multiagent reinforcement learning) (Li, H. et al., 2025; Korivand, 2024; Lin, 2024; Shankar, 2023; Park, 2022; Li, 2022; Liu, 2022; Zhao, 2024; Xi, 2015), так и не предполагающие обучения агентов (Argoneto et al., 2013; Krenczyk et al., 2015; Wang et al., 2019; Renna, 2024). При построении гибридных решений как рассматривают кооперативные (Korivand, 2024; Lin, 2024; Shankar, 2023; Park, 2022) и конкурентные (Li, 2022) игры в отдельности, так и предоставляют агентам возможность выбора кооперации или конкуренции (Liu, 2022; Zhao, 2024; Xi, 2015).

Многие разработки данного направления связаны с MARL (Li, H. et al., 2025; Korivand, 2024; Lin, 2024; Shankar, 2023; Park, 2022; Li, 2022; Liu, 2022; Zhao, 2024; Xi, 2015) и учитывают особенности данного подхода, из-за чего представленные в данном направлении решения по построению когнитивных агентов неприменимы для решения задач, не требующих MARL, без адаптации инструментов. В контексте разработанной формализации задачи составления расписания в распределенных производственных системах наиболее интересны из представленных решений те, в которых агентам предоставлена возможность выбирать кооперацию или конкуренцию. Разнообразие сценариев, вызванное возможностью выбора кооперации или конкуренции, влияет на вид Q-функции, а также на процесс работы агентов (Liu, 2022; Zhao, 2024; Xi, 2015).

Разработаны (Liu, 2022) модель равновесия в мультиагентной системе выработки аварийной энергии и теоретический фреймворк, основанный на Q-обучении Нэша (Nash Q-learning) и учитывающий индивидуальные предпочтения поставщиков. Вариативность коммуникативных стратегий агентов учитывается при расчете значений Q-функции индивидов и их групп.

Предложены алгоритм и архитектура мультиагентной системы для решения задачи друг-или-враг (Friend-or-Foe Game) (Zhao, 2024). Решение протестировано на примере задачи управления беспилотными летающими средствами в открытом космосе. Решение основано на алгоритме актор-критик. Конкуренция и кооперация учитываются при задании Q-функции. Друзьями – агентами, с которыми определяющий значение функции кооперирует, – являются агенты, действия которых максимизируют Q-функцию. Минимизирующие Q-функцию агента считаются его врагами. Подробности построения Q-функции агента не освещаются. В ходе действий агент максимизирует значение Q-функции с использованием DDPG (Deep Deterministic Policy Gradients) алгоритма.

Разработана мультиагентная схема управления для автоматического управления координацией взаимосвязанных сложных энергетических систем (Xi, 2015). В решении для агентов задается множество смешанных стратегий, отражающих способности агента к конкуренции и кооперации. Подход к построению агента, способного выбирать конкурентные и кооперативные стратегии, подробно не описан.

Представлено множество гибридных инструментов, объединяющих возможности МАС и теории игр, и при этом не использующих RL (Argoneto et al., 2013; Krenczyk et al, 2015; Wang et al., 2019). Среди данных решений есть и разработанные для построения расписаний в производственных системах (Wang et al., 2019), однако решений с предоставлением агентам возможности выбора коммуникативных стратегий среди них нет. Среди решений по планированию работ в распределенных географически сетях производств (Argoneto et al., 2013; Krenczyk et al, 2015) также нет решений, основанных на МАС и при этом позволяющих рассматривать и кооперативные, и конкурентные игры.

Представлены исследования, целью которых была разработка гибридных инструментов, объединяющих МАС и методы теории игр. Данные решения применимы в различных предметных областях, реализуются как с использованием RL, так и без него. Представленная формализация заполняет лауну в научном дискурсе, представляя способ формирования когнитивных агентов в мультиагентных системах, имеющих возможность выбирать коммуникативные стратегии и адаптированных для решения не требующих применения RL задач составления расписания в распределенных производственных системах.

5. Заключение

В работе представлена формализация задачи составления расписания в распределенных производственных системах с учетом их ключевых особенностей – неопределенности, мультиагентного характера взаимодействия и множественности целевых функций. На основе анализа опыта применения МАС и методов теории игр предложено описание структурных элементов распределенных производственных систем в контексте задачи формирования расписания. Построены онтологическая модель коммуникационной сети МАС, формализация агентов в терминах BDI и теоретико-игрового подхода, онтологическая модель процесса формирования расписания в распределенной производственной системе. Реализация данных моделей позволяет разработать цифровую модель системы теоретико-игровых агентов, отражающую различные типы взаимодействия участников, в том числе восходящий и нисходящий паттерны игрового взаимодействия. Это обеспечивает возможность моделирования различных сценариев управления распределенными производственными системами. Предложенный подход позволяет учесть многообразие коммуникативных стратегий и согласовать локальные цели участников системы, что повышает устойчивость управленческих решений по формированию расписаний и их практическую применимость. Полученные результаты могут служить основой для разработки систем поддержки принятия решений в области планирования расписания распределенных производственных систем.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00322, <https://rscf.ru/project/25-21-00322/>

Список литературы

- Argoneto, P.; Renna, P. Capacity sharing in a network of enterprises using the Gale–Shapley model. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013, 69, 1907–1916.
- Boissier, O., Bordini, R.H., Hübner, J.F., Ricci, A., 2020. *Multi-Agent Oriented Programming: Programming Multi-Agent Systems Using JaCaMo*. MIT Press.
- Calegari, R., Ciatto, G., Denti, E., Omicini, A., 2021. Logic-based technologies for multi-agent systems: a systematic literature review. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 35 (1), 1. <https://doi.org/10.1007/s10458-020-09478-3>
- Ding, H., Zhuang, C., Liu, J., 2023. Extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *Automation in Construction* 153, 104955. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104958>
- Drobnjakovic, M., Kulvatunyou, B., Ameri, F., Will, C., Smith, B., 2022. The industrial ontologies foundry (IOF) core ontology.

- Garey, M.R., Johnson, D.S., 1979. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, 1st ed. W. H. Freeman and Company, New York.
- Gorodetsky, V., Karsaev, O., Konyushiy, V., Samoylov, V., 2012. Transportation Logistics Services from Cloud, in: 2012 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology. IEEE, pp. 215–219. <https://doi.org/10.1109/WI-IAT.2012.55>
- Gorodetsky, V., Karsaev, O., Samoylov, V., Skormin, V., 2008. Multi-Agent Technology for Air Traffic Control and Incident Management in Airport Airspace, in: 5th International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT-08), pp. 118–125.
- Gorodetsky, V., Kozhevnikov, S., Novichkov, D., Skobelev, P., 2019. The Framework for Designing Autonomous Cyber-Physical Multiagent Systems for Adaptive Resource Management, in: *Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. Springer, Cham, pp. 52–64. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27878-6_5
- Gorodetsky, V., Samoylov, V., Trotsky, D., 2015. The reference ontology of collective behavior of autonomous agents and its extensions. *Journal of Computer and Systems Sciences International* 54 (5), 765–782. <https://doi.org/10.1134/S1064230715030089>
- Granichin, O., Skobelev, P., Lada, A., Mayorov, I., Tsarev, A., 2013. Cargo Transportation Models Analysis using Multi-Agent Adaptive Real-Time Truck Scheduling System, in: *Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence – Volume 2: ICAART*, pp. 244–249. <https://doi.org/10.5220/0004225502440249>
- Hadzic, M., Taslimi, M.S., Chang, E., 2009. *Ontology-Based Multi-Agent Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01904-3>
- Han, Z.; Bian, X.; Ding, Z.; Sun, D. Optimisation of group batch scheduling in flexible flow shop based on multi-player cooperative game. *Int. J. Model. Identif. Control* 2022, 40, 114–126.
- Hartmann, S., Briskorn, D., 2022. An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 297 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.004>
- Hooker, J.N., 2006. *Operations Research Methods in Constraint Programming*, in: Rossi, F., van Beek, P., Walsh, T. (eds.), *Foundations of Artificial Intelligence*. Elsevier, pp. 527–570. [https://doi.org/10.1016/S1574-6526\(06\)80019-2](https://doi.org/10.1016/S1574-6526(06)80019-2)
- Kiran, D.R., 2019. *Production Planning and Control: A Comprehensive Approach*. Butterworth-Heinemann.
- Korivand, S.; Galvani, G.; Ajoudani, A.; Gong, J.; Jalili, N. Optimizing Human-Robot Teaming Performance through Q-Learning Based Task Load Adjustment and Physiological Data Analysis. *Sensors* 2024, 24, 2817.
- Krenczyk, D.; Olender, M. Simulation Aided Production Planning and Scheduling Using Game Theory Approach. *Appl. Mech. Mater.* 2015, 809–810, 1450–1455.
- Lapshenkov, G.I., 2010. *Sistemnyj analiz. Issledovanie operacij: uchebnoe posobie [System Analysis. Operations Research: a textbook]*. MITHT im. M.V. Lomonosova, Moscow.
- Li, H., Yang, P., Liu, W., Yan, S., Zhang, X., & Zhu, D. (2025). Multi-Agent Reinforcement Learning in Games: Research and Applications. *Biometrics*, 10(6), 375.
- Li, X.; Xi, L.; Zha, W.; Peng, Z. Minimax Q-learning design for H_∞ control of linear discrete-time systems. *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.* 2022, 23, 438–451.
- Lim, J., Lanza, F., Nycz, T., Lu, Y., Morris, K.C., 2023. Ontology-Based Feedback to Improve Runtime Control for Multi-Agent Manufacturing Systems, in: 2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CASE56687.2023.10260630>
- Lin, S.-W.; Chu, C.-C. Distributed Q-Learning-Based Voltage Restoration Algorithm in Isolated AC Microgrids Subject to Input Saturation. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2024, 60, 5447–5459.
- Liu, X. A large-scale equilibrium model of energy emergency production: Embedding social choice rules into Nash Q-learning automatically achieving consensus of urgent recovery behaviors. *Energy* 2022, 259, 125023.
- Massart, D.L., Vandeginste, B.G.M., Deming, S.N., Michotte, Y., Kaufman, L. (eds.), 2003. *Operations Research*, in: *Data Handling in Science and Technology*. Elsevier, pp. 419–435.
- May, M.C., Batsaikhan, M., Lu, Y., Morris, K.C., 2022. Ontology-Based Production Simulation with OntologySim. *Applied Sciences* 12 (3), 1608. <https://doi.org/10.3390/app12031608>
- Mingozzi, A., Maniezzo, V., Ricciardelli, S., Bianco, L., 1998. An Exact Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem Based on a New Mathematical Formulation. *Management Science* 44 (5), 714–729. <https://doi.org/10.1287/mnsc.44.5.714>
- Moukrim, A., Quilliot, A., Toussaint, H., 2015. An effective branch-and-price algorithm for the Preemptive Resource Constrained Project Scheduling Problem based on minimal Interval Order Enumeration. *European Journal of Operational Research* 244 (2), 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.037>
- Park, Y.-J.; Kim, J.-E.; Lee, S.-H.; Cho, K.-H. An Effective Design Formula for Single-Layer Printed Spiral Coils with the Maximum Quality Factor (Q-Factor) in the Megahertz Frequency Range. *Sensors* 2022, 22, 7761.
- Renna, P. (2024). A review of game theory models to support production planning, scheduling, cloud manufacturing and sustainable production systems. *Designs* 8 (2): 26.
- Shankar, S.; Young, R.A.; Young, M.E. Action-Project Method: An approach to describing and studying goal-oriented joint actions. *Med. Educ.* 2023, 57, 131–141.
- Shpilevoy V. et al. Multi-agent system “Smart Factory” for real-time workshop management in aircraft jet engines production //IFAC Proceedings Volumes. – 2013. – T. 46. – №. 7. – С. 204-209.
- Shukla O. J. et al. A review of multi agent-based production scheduling in manufacturing system //Recent Patents on Engineering. – 2021. – T. 15. – №. 5. – С. 15-32.
- Siatras V. et al. On the use of asset administration shell for modeling and deploying production scheduling agents within a multi-agent system //Applied Sciences. – 2023. – T. 13. – №. 17. – С. 9540.
- Skobelev, P., 2011. Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Applications, in: 5th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011). Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23181-0_1
- Taha, H.A., 2005. *Operations Research: An Introduction*, 7th ed. Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Taillard, E.D., 1993. Benchmarks for basic scheduling problems. *European Journal of Operational Research* 64 (2), 278–285. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90182-M](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90182-M)

- Tushkanova, O., Gorodetsky, V., 2015. Data-driven semantic concept analysis for automatic actionable ontology design, in: 2015 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). IEEE, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/DSAA.2015.7344893>
- Volkova, V.N., Loginova, A.V., Shirokova, S.V., Iakovleva, E.A., 2016. Models for the study of the priorities of innovative companies, in: 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). IEEE, pp. 515–517. <https://doi.org/10.1109/SCM.2016.7519831>
- Wang, J.; Zhang, Y.; Liu, Y.; Wu, N. Multiagent and Bargaining-Game-Based Real-Time Scheduling for Internet of Things-Enabled Flexible Job Shop. *IEEE Internet Things J.* 2019, 6, 2518–2531.
- Wooldridge, M.J., 2009. *An Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons Publ., Chichester, UK.
- Xi, L.; Yu, T.; Yang, B.; Zhang, X. A novel multi-agent decentralized win or learn fast policy hill-climbing with eligibility trace algorithm for smart generation control of interconnected complex power grids. *Energy Convers. Manag.* 2015, 103, 82–93.
- Xiong, H., Shi, S., Ren, D., Hu, J., 2022. A survey of job shop scheduling problem: The types and models. *Computers & Operations Research* 142, 105731. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105731>
- Zeng, M., Wei, W., Zhang, X., Ju, Y., 2009. The Risk Evaluation of Human Resources for Power Supplying Company Based on Cloud Model, in: 2009 International Conference on Management and Service Science. IEEE, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2009.5303651>
- Zhao, X.; Hu, H.; Sun, D. Cooperation with Humans of Unknown Intentions in Confined Spaces Using the Stackelberg Friend-or-Foe Game. In *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2024; pp. 1–13.
- Борознов В.О. Исследование решения задачи коммивояжера // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 2. С. 147–151.
- Владимиров А.В. Моделирование взаимодействия агентов в многоагентной системе с помощью цветных сетей Петри и нечеткой логики // Программные продукты и системы. 2014. № 1 (105). С. 44–50.
- Городецкий В.И., Бухвалов О.Л., Скобелев П.О. Современное состояние и перспективы промышленных применений многоагентных систем // Управление большими системами: сборник трудов. 2017. № 66. С. 94–157.
- Городецкий В.И., Карсаев О.В. Многоагентная система планирования и составления расписаний: разработка распределенной базы знаний // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2001. Т. 22. № 4. С. 25–38.
- Гривачев А.В., Сазонов С.Ю. Сравнительный анализ подходов и методов многокритериального выбора сложных мобильных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 5. С. 35–43.
- Громов С.А., Тарасов В.Б. Интегрированные интеллектуальные системы оперативного планирования производства // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. Т. 120. № 7. С. 60–67.
- Гужа Е.Д., Романенко В.А., Скороход М.А. Нечёткая оценка эффективности трансферной системы авиаперевозок // Управление большими системами: сборник трудов. 2019. № 77. С. 219–260.
- Загидуллин Р.Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP. Полная версия. Старый Оскол: ТНТ, 2021.
- Захарченков К.В., Мрочек Ж.А., Мрочек Т.В. Алгоритм решения многокритериальной задачи планирования производства труб и фасонных изделий // Системный анализ и прикладная информатика. 2018. № 4. С. 4–10. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2018-4-4-10>
- Каримов Ж.Х. Процедуры оптимизации глобальных целей системы управления многостадийными процессами // Universum: технические науки. 2021. № 11–1 (92). С. 48–52.
- Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний: задачи и алгоритмы. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011.
- Лапшенков Г.И. Системный анализ. Исследование операций. М.: МИТХТ, 2010.
- Лудан М.В., Нужнов Е.В. Решение задачи трехмерной упаковки с палитированием контейнеров // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 7. С. 196–204.
- Магомедов О.Р., Чернышев С.А. Мультиагентная система поддержки принятия решений для минимизации стоимости группируемых товаров // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы модели, анализ и управление. 2022. № 4. С. 97–107. <https://doi.org/10.18137/RNU.V9187.22.04.P.97>
- Новиков Д. А. Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. – 2016.
- Родионов Д.Г., Алферьев Д.А. Устойчивость оптимального плана производства инновационной продукции промышленного предприятия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2020. Т. 13. № 5. С. 106–119. <https://doi.org/10.18721/JE.13508>
- Чернышев С.А. Проблемы мультиагентных систем и возможные пути их решения // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы модели, анализ и управление. 2023. № 3. С. 103–113. <https://doi.org/10.18137/Rnu.v9187.23.03.p.231>
- Шарко П.А., Бурлуцкая Ж.В. Подход к выбору организационной структуры агентов при моделировании сложных организационных систем // Интеллектуальная инженерная экономика и Индустрия 6.0 (ИНПРОМ-2025). СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. С. 523–526. <https://doi.org/10.18720/IEP/2025.2/142>
- Швецов А.Н., Дианов С.В., Дианов Д.С. Проектирование мультиагентной системы разрешения межфункциональных конфликтов на предприятии. Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 1 (106). С. 74–89. <https://doi.org/10.23859/1995-0665-2022-1-106-6>
- Шориков А.Ф., Коровин Г.Б., Сиротин Д.В. Методология управления промышленным комплексом региона: архитектура агент-ориентированной модели // Управленец. 2023. Т. 14. № 6. С. 63–76. <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2023-14-6-5>

References

- Argoneto, P.; Renna, P. Capacity sharing in a network of enterprises using the Gale–Shapley model. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013, 69, 1907–1916.
- Boissier, O., Bordini, R.H., Hübner, J.F., Ricci, A., 2020. *Multi-agent oriented programming: programming multi-agent systems using JaCaMo*. Mit Press.
- Boroznov, V.O., 2009. Issledovanie resheniya zadachi kommiwoyazhera [Research of the solution to the traveling salesman problem]. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 2, 147–151.
- Calegari, R., Ciatto, G., Denti, E., Omicini, A., 2021. Logic-based technologies for multi-agent systems: a systematic literature review. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 35 (1), 1. <https://doi.org/10.1007/s10458-020-09478-3>
- Chernyshev, S.A., 2023. Problems Of Multi-Agent Systems and Possible Ways to Solve Them. *Vestnik of the Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis, Management* 3, 103–113. <https://doi.org/10.18137/Rnu.v9187.23.03.p.231>

- Ding, H., Zhuang, C., Liu, J., 2023. Extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *Automation in Construction* 153, 104955. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104958>
- Drobnjakovic, M., Kulvatunyou, B., Ameri, F., Will, C., Smith, B., 2022. The Industrial Ontologies Foundry (IOF) Core Ontology, in: *Formal Ontologies Meet Industry (FOMI) 2022*. Tarbes.
- Garey, M.R., Johnson, D.S., 1979. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, 1st ed. W. H. Freeman and Company, New York.
- Gorodetsky, V.I., Buhvalov, O.L., Skobelev, P.O., 2017. Industrial Applications of Multi-Agent Systems: Current State and Prospects. *Large-Scale Systems Control: Proceedings* 66, 94–157.
- Gorodetsky, V.I., Karsaev, O.V., 2001. Mnogoagentnaya sistema planirovaniya i sostavljeniya raspisanij: razrabotka raspredelennoj bazy znaniy [Multi-agent planning and scheduling system: development of a distributed knowledge base]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences* 22 (4), 99–105.
- Gorodetsky, V., Karsaev, O., Konyushiy, V., Samoylov, V., 2012. Transportation Logistics Services from Cloud, in: *2012 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*. IEEE, pp. 215–219. <https://doi.org/10.1109/WI-IAT.2012.55>
- Gorodetsky, V., Karsaev, O., Samoylov, V., Skormin, V., 2008. Multi-Agent Technology for Air Traffic Control and Incident Management in Airport Airspace, in: *5th International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT-08)*, pp. 118–125.
- Gorodetsky, V., Kozhevnikov, S., Novichkov, D., Skobelev, P., 2019. The Framework for Designing Autonomous Cyber-Physical Multiagent Systems for Adaptive Resource Management, in: *Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. Springer, Cham, pp. 52–64. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27878-6_5
- Gorodetsky, V., Samoylov, V., Trotsky, D., 2015. The reference ontology of collective behavior of autonomous agents and its extensions. *Journal of Computer and Systems Sciences International* 54 (5), 765–782. <https://doi.org/10.1134/S1064230715030089>
- Granichin, O., Skobelev, P., Lada, A., Mayorov, I., Tsarev, A., 2013. Cargo Transportation Models Analysis using Multi-Agent Adaptive Real-Time Truck Scheduling System, in: *Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence – Volume 2: ICAART*, pp. 244–249. <https://doi.org/10.5220/0004225502440249>
- Grivachov A.V., Sazonov S.Y., 2016. Comparative Analysis of Approaches and Methods of Multi-Criteria Selection for Sophisticated Mobile Systems. *Proceedings of the Southwest State University* 5, 35–43.
- Gromov, S.A., Tarasov, V.B., 2011. Integrated Intelligent Systems of Production Planning and Scheduling. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences* 120 (7), 60–67.
- Guzha, E.D., Romanenko, V.A., Skorokhod, M.A., 2019. Fuzzy Assessment of Performance of Air Transportation Transfer System. *Large-Scale Systems Control: Proceedings* 77, 219–260.
- Hadzic, M., Taslimi, M.S., Chang, E., 2009. *Ontology-Based Multi-Agent Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01904-3>
- Han, Z.; Bian, X.; Ding, Z.; Sun, D. Optimisation of group batch scheduling in flexible flow shop based on multi-player cooperative game. *Int. J. Model. Identif. Control* 2022, 40, 114–126.
- Han, Z.; Zhu, Y.; Ma, X.; Chen, Z. Multiple rules with game theoretic analysis for flexible flow shop scheduling problem with component altering times. *Int. J. Model. Identif. Control* 2016, 26, 1–18.
- Hartmann, S., Briskorn, D., 2022. An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 297 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.004>
- Hooker, J.N., 2006. Operations Research Methods in Constraint Programming, in: Rossi, F., van Beek, P., Walsh, T. (eds.), *Foundations of Artificial Intelligence*. Elsevier, pp. 527–570. [https://doi.org/10.1016/S1574-6526\(06\)80019-2](https://doi.org/10.1016/S1574-6526(06)80019-2)
- Karimov, J.H., 2021. Procedures for optimizing global goals of a multistage process control system. *Universum: Technical Sciences* 11–1 (92), 48–52.
- Kiran, D.R., 2019. *Production Planning and Control: A Comprehensive Approach*. Butterworth-Heinemann.
- Korivand, S.; Galvani, G.; Ajoudani, A.; Gong, J.; Jalili, N. Optimizing Human-Robot Teaming Performance through Q-Learning Based Task Load Adjustment and Physiological Data Analysis. *Sensors* 2024, 24, 2817.
- Krenczyk, D.; Olender, M. Simulation Aided Production Planning and Scheduling Using Game Theory Approach. *Appl. Mech. Mater.* 2015, 809–810, 1450–1455.
- Lazarev, A.A., Gafarov, E.R., 2011. *Teoriya raspisanij: Zadachi i algoritmy [Scheduling Theory: Problems and Algorithms]*. Moscow University Press, Moscow.
- Lapshenkov, G.I., 2010. *Sistemnyj analiz. Issledovanie operacij: uchebnoe posobie [System Analysis. Operations Research: a textbook]*. MITHT im. M.V. Lomonosova, Moscow.
- Li, H., Yang, P., Liu, W., Yan, S., Zhang, X., & Zhu, D. (2025). Multi-Agent Reinforcement Learning in Games: Research and Applications. *Biometrics*, 10(6), 375.
- Li, X.; Xi, L.; Zha, W.; Peng, Z. Minimax Q-learning design for H_∞ control of linear discrete-time systems. *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.* 2022, 23, 438–451.
- Lin, S.-W.; Chu, C.-C. Distributed Q-Learning-Based Voltage Restoration Algorithm in Isolated AC Microgrids Subject to Input Saturation. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2024, 60, 5447–5459.
- Lim, J., Lanza, F., Nycz, T., Lu, Y., Morris, K.C., 2023. Ontology-Based Feedback to Improve Runtime Control for Multi-Agent Manufacturing Systems, in: *2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CASE56687.2023.10260630>
- Liu, X. A large-scale equilibrium model of energy emergency production: Embedding social choice rules into Nash Q-learning automatically achieving consensus of urgent recovery behaviors. *Energy* 2022, 259, 125023.
- Massart, D.L., Vandeginste, B.G.M., Deming, S.N., Michotte, Y., Kaufman, L. (eds.), 2003. *Operations Research*, in: *Data Handling in Science and Technology*. Elsevier, pp. 419–435.
- May, M.C., Batsaikhan, M., Lu, Y., Morris, K.C., 2022. Ontology-Based Production Simulation with OntologySim. *Applied Sciences* 12 (3), 1608. <https://doi.org/10.3390/app12031608>
- Mingozzi, A., Maniezzo, V., Ricciardelli, S., Bianco, L., 1998. An Exact Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem Based on a New Mathematical Formulation. *Management Science* 44 (5), 714–729. <https://doi.org/10.1287/mnsc.44.5.714>
- Moukrim, A., Quilliot, A., Toussaint, H., 2015. An effective branch-and-price algorithm for the Preemptive Resource Constrained Project Scheduling Problem based on minimal Interval Order Enumeration. *European Journal of Operational Research* 244 (2), 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.037>

- Park, Y.-J.; Kim, J.-E.; Lee, S.-H.; Cho, K.-H. An Effective Design Formula for Single-Layer Printed Spiral Coils with the Maximum Quality Factor (Q-Factor) in the Megahertz Frequency Range. *Sensors* 2022, 22, 7761.
- Renna, P. (2024). A review of game theory models to support production planning, scheduling, cloud manufacturing and sustainable production systems. *Designs* 8 (2): 26.
- Shankar, S.; Young, R.A.; Young, M.E. Action-Project Method: An approach to describing and studying goal-oriented joint actions. *Med. Educ.* 2023, 57, 131–141.
- Shpilevoy V. et al. Multi-agent system “Smart Factory” for real-time workshop management in aircraft jet engines production //IFAC Proceedings Volumes. – 2013. – Т. 46. – №. 7. – С. 204-209.
- Shukla O. J. et al. A review of multi agent-based production scheduling in manufacturing system //Recent Patents on Engineering. – 2021. – Т. 15. – №. 5. – С. 15-32.
- Siatras V. et al. On the use of asset administration shell for modeling and deploying production scheduling agents within a multi-agent system //Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – №. 17. – С. 9540.
- Skobelev, P., 2011. Multi-Agent Systems for Real Time Resource Allocation, Scheduling, Optimization and Controlling: Industrial Applications, in: 5th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS 2011). Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23181-0_1
- Taha, H.A., 2005. Operations Research: An Introduction, 7th ed. Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Taillard, E.D., 1993. Benchmarks for basic scheduling problems. *European Journal of Operational Research* 64 (2), 278–285. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90182-M](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90182-M)
- Tushkanova, O., Gorodetsky, V., 2015. Data-driven semantic concept analysis for automatic actionable ontology design, in: 2015 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). IEEE, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/DSAA.2015.7344893>
- Volkova, V.N., Loginova, A.V., Shirokova, S.V., Iakovleva, E.A., 2016. Models for the study of the priorities of innovative companies, in: 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). IEEE, pp. 515–517. <https://doi.org/10.1109/SCM.2016.7519831>
- Wang, J.; Zhang, Y.; Liu, Y.; Wu, N. Multiagent and Bargaining-Game-Based Real-Time Scheduling for Internet of Things-Enabled Flexible Job Shop. *IEEE Internet Things J.* 2019, 6, 2518–2531.
- Wooldridge, M.J., 2009. An Introduction to Multiagent Systems. John Wiley & Sons Publ., Chichester, UK.
- Xi, L.; Yu, T.; Yang, B.; Zhang, X. A novel multi-agent decentralized win or learn fast policy hill-climbing with eligibility trace algorithm for smart generation control of interconnected complex power grids. *Energy Convers. Manag.* 2015, 103, 82–93.
- Xiong, H., Shi, S., Ren, D., Hu, J., 2022. A survey of job shop scheduling problem: The types and models. *Computers & Operations Research* 142, 105731. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105731>
- Zeng, M., Wei, W., Zhang, X., Ju, Y., 2009. The Risk Evaluation of Human Resources for Power Supplying Company Based on Cloud Model, in: 2009 International Conference on Management and Service Science. IEEE, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2009.5303651>
- Zhao, X.; Hu, H.; Sun, D. Cooperation with Humans of Unknown Intentions in Confined Spaces Using the Stackelberg Friend-or-Foe Game. In *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2024; pp. 1–13

Статья поступила в редакцию 01.07.2025, одобрена после рецензирования 14.07.2025, принята к публикации 23.07.2025.

The article was submitted 01.07.2025, approved after reviewing 14.07.2025, accepted for publication 23.07.2025.

Информация об авторах:

1. Жанна Бурлукская, без звания, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, <https://orcid.org/0000-0002-5680-1937>, zhanna.burlutskaya@spbpu.com
2. Полина Шарко, без звания, инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, <https://orcid.org/0009-0006-4775-5189>, polina.sharko@spbpu.com
3. Алексей Гинцяк, канд. техн. наук, без звания, Заведующий лабораторией, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, <https://orcid.org/0000-0002-9703-5079>, gintsyak_am@spbstu.ru
4. Капитон Поспелов, без звания, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, <https://orcid.org/0009-0001-6160-8218>, kapiton.pospelov@spbpu.com

About the authors:

1. Zhanna Burlutskaya, posten, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, <https://orcid.org/0000-0002-5680-1937>, zhanna.burlutskaya@spbpu.com
2. Polina Sharko, posten, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, <https://orcid.org/0009-0006-4775-5189>, polina.sharko@spbpu.com
3. Aleksei Gintciak, Head of the laboratory, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, <https://orcid.org/0000-0002-9703-5079>, gintsyak_am@spbstu.ru
4. Kapiton Pospelov, posten, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, <https://orcid.org/0009-0001-6160-8218>, kapiton.pospelov@spbpu.com