



ISSN 2782-6333

**SUSTAINABLE
DEVELOPMENT
and
ENGINEERING
ECONOMICS**

04
2025

Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Главный редактор: Ирина Андреевна Рудская (Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Альберто Трон (Университет Боккони, Милан, Италия)
Алексей Быков (Белорусский государственный экономический университет, Минск, Республика Беларусь)
Алексей М. Гинцяк (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия)
Алла Г. Кравец (Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия)
Эндрю А. Алола (Стамбульский университет Гелисим, Стамбул, Турция)
Анги Е. Схведиани (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия)
Дмитрий Г. Родионов (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия)
Эдуарда Пинту Феррейра (Политехнический университет Порту, Португалия)
Эмма Хуанеда-Айенса (Университет Ла-Риохи, Логроньо, Испания)
Гилян В. Федотова (Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” Российской Академии Наук, Москва, Россия)
Джефффри Шен (Гонконгский политехнический университет, Гонконг)
Игорь И. Дюков (Университет LUT, Лаппеенранта, Финляндия)
Иосиф Л. Туккель (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия)
Ирина А. Брусакова (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия)
Ионель Бостан (Сучавский университет им. Штефана чел Маре, Сучава, Румыния)
Лев С. Мазелис (Владивостокский государственный университет, Владивосток, Россия)
Луис Борхес Говейя (Университет Фернанду Песоа, Порту, Португалия)
Мария А. Молодчик (Национальный Исследовательский Университет Высшая Школа Экономики, Пермь, Россия)
Максим В. Щербаков (Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия)
Мохаммед Али Берави (Университет Индонезии, Депок, Индонезия)
Никита А. Моисеев (Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия)
Ольга В. Кожевина (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия)
Ольга С. Пескова (Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия)
Сергей В. Арженовский (Отделение по Ростовской области Южного главного управления Банка России, Ростов-на-Дону, Россия)
Сергей Г. Редько (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия)
Сергей Сосновских (Университет Де Монфора, Лестер, Великобритания)
Татьяна Ю. Кудрявцева (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия)
Татьяна И. Кузьмина (Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия)
Тенгиз Маградзе (Грузинский технический университет, Тбилиси, Грузия)
Чжикай Ван (Чжэцзянский университет, Ханчжоу, Китай)

РЕДАКЦИЯ

Ответственный редактор

Анги Схведиани

Ответственный секретарь

Виктория Бразовская

Менеджер по развитию

Анастасия Кулачинская

Верстка

Евгения Фомина

Учредитель

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Адрес:

195251, Россия, Санкт-Петербург,
Политехническая 29

Контакты:

Почта: sustainable@spbstu.ru

Веб-сайт: <https://sustainable.spbstu.ru/>

Editor-in-chief: Irina Rudskaia (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia)

EDITORIAL BOARD

Alberto Tron (Bocconi University, Milan, Italy)
Aleksii Bykov (Belarus State Economic University, Minsk, Republic of Belarus)
Aleksii M. Gintciak (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation)
Alla Kravets (Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia)
Andrew A. Alola (Istanbul Gelisim University, İstanbul, Turkey)
Angi Skhvediani (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia)
Dmitrii Rodionov (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia)
Eduarda Pinto Ferreira (Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do Porto, Porto, Portugal)
Emma Juaneda-Ayensa (University of La Rioja, Logroño, La Rioja, Spain)
Geoffrey Shen (The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)
Gilyan Fedotova (Federal Research Center "Informatics and Management" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)
Igor Dukeov (LUT University, Lappeenranta, Finland)
Ionel Bostan (Ștefan cel Mare University of Suceava, Suceava, Romania)
Iosif L. Tukkel (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation)
Irina Brusakova (St Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia)
Lev Mazelis (Vladivostok State University, Vladivostok, Russia)
Luis Borges Gouveia (University Fernando Pessoa, Porto, Portugal)
Maria Molodchik (HSE University, Perm, Russia)
Maxim Shcherbakov (Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia)
Mohammed Ali Berawi (Universitas Indonesia, Depok, Indonesia)
Nikita Moiseev (Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia)
Olga Kozhevina (Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia)
Olga Peskova (Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia)
Sergey Arzhenovskiy (Rostov Regional Division of the Southern Main Branch of the Central Bank of the Russian Federation, Rostov-on-Don, Russia)
Sergey Redko (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia)
Sergey Sosnovskikh (De Montfort University, Leicester, United Kingdom)
Tatiana Kudryavtseva (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia)
Tatiana Kuzmina (Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia)
Tengiz Magradze (Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia)
Zhikai Wang (Zhejiang University, Hangzhou, China)

EDITORS OFFICE

Executive editor

Angi Skhvediani

Executive Secretary

Viktoriia Brazovskaia

Development Manager

Anastasiya Kulachinskaya

Layout designer

Evgeniia Fomina

Publisher

Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University

Corresponding address:

29 Polytechnicheskaya st., Saint-Petersburg,
195251, Russia

Contacts:

Email: sustainable@spbstu.ru

Web: <https://sustainable.spbstu.ru/>

Математическое моделирование и адаптивное управление в организационно-технических системах

Современные производственные системы сталкиваются с нарастающей неопределенностью и внешним воздействием. В эпоху цифровизации ключевым критерием эффективности становится именно адаптивность систем. Основным вызов для исследователей заключается в поиске математических и алгоритмических решений, способных обеспечить долгосрочную устойчивость бизнес-процессов.

В статье Нефёдовой Л. «Математическое обеспечение адаптивного проектирования в аддитивном производстве» исследуется потенциал повышения экономической эффективности производства за счет интеллектуализации этапа проектирования. Разработанная многоэтапная процедура отбора фрагментов знаний позволяет сократить трудоемкость проектирования и формирует основу для самообучающейся базы знаний предприятия.

Работа Бурлуцкой Ж., Шарко П., Лундаевой К. и Бекетова С. «Метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах» посвящена формализации организационной структуры производственных систем. Авторы рассматривают технологический процесс как систему взаимодействующих агентов с множественными целевыми функциями и ограниченной рациональностью. Результатом исследования стала онтологическая модель, описывающая типовых агентов и их стратегии, апробированная на примере нефтегазовой отрасли.

В исследовании Карванен О. и Гинцяка А. «Алгоритм принятия решения об оптимизации размещения грузов на складе в компаниях 3PL-логистики» представлена система количественных показателей эффективности складского хранения. Особое внимание уделено показателю актуальности конфигурации склада, позволяющему оценивать соответствие инфраструктуры меняющемуся грузопотоку.

Статья Козиковой Д. «Имитационное моделирование процессов интеграции инноваций в учебную деятельность образовательных организаций» рассматривает образовательную организацию как сложную динамическую систему. Автор проводит сравнительный анализ дискретно-событийного, агентного моделирования и системной динамики применительно к задачам внедрения инноваций. Центральным результатом является теоретическая модель, раскрывающая системные взаимосвязи образовательной среды и позволяющая анализировать нелинейные последствия управленческих решений.

В работе Даниленко К. и Брусаковой И. «Анализ устойчивости адаптивной бизнес-модели цифрового предприятия в многокомпонентной среде» предложена математическая модель предприятия, функционирующего под воздействием разнородных внешних факторов. С использованием аппарата нелинейной теории управления авторы доказали условия, при которых система сохраняет устойчивость благодаря переключению между контурами стабильности и адаптации.

*Ирина Рудская, главный редактор журнала SDEE,
доктор экономических наук, профессор*

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Нефёдова, Л.</i> Математическое обеспечение адаптивного проектирования в аддитивном производстве.....	7
<i>Бурлуцкая, Ж., Шарко, П., Лундаева, К., Бекетов, С.</i> Метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах	24
<i>Карванен, О., Гинцяк, А.</i> Алгоритм принятия решения об оптимизации размещения грузов на складе в компаниях 3PL-логистики	38
<i>Козикова, Д.</i> Имитационное моделирование процессов интеграции инноваций в учебную деятельность образовательных организаций	49
<i>Даниленко, К., Брусакова, И.</i> Анализ устойчивости адаптивной бизнес-модели цифрового предприятия в многокомпонентной среде.....	64

TABLE OF CONTENTS

<i>Nefedova, L.</i> Mathematical models for adaptive design in additive manufacturing.....	8
<i>Burlutskaya, Z., Sharko, P., Lundaeva, K., Beketov, S.</i> Method of modeling multi-agent interactions in complex technological processes	25
<i>Karvanen, O., Gintciak, A.</i> Decision-making algorithm for optimizing cargo storage in 3PL logistics companies.....	39
<i>Kozikova, D.</i> Simulation modeling of the processes of integrating innovations into the educational activities of educational organizations	50
<i>Danilenko, K., Brusakova, I.</i> Sustainability analysis of an adaptive digital enterprise business model in a multi-component systems.....	65

Научная статья

УДК 004.81

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.1>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АДАПТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Любовь Нефёдова* 

Научно-исследовательский институт прикладного материаловедения Концерна ВКО «Алмаз – Антей», Санкт-Петербург, Российская Федерация, nefedova@goz.ru

*Автор, ответственный за переписку: nefedova@goz.ru

Аннотация

В статье рассматривается концепция цифровой нити аддитивного производства как основа для повышения экономической эффективности производственного цикла за счет интеллектуальной поддержки этапа проектирования. Предлагаются математическая модель и алгоритмическая процедура этапа «Поиск и подбор фрагментов знаний» в рамках авторского развития модели адаптивного управления МАРЕ-К за счет включения этапов поиска, повторного использования и оценки. Показано, что наиболее существенный потенциал повышения производительности аддитивного производства сосредоточен на стадии проектирования цифровых моделей изделий и технологических процессов, где применение методов онтологического моделирования и машинного обучения позволяет существенно сократить трудоемкость и повысить качество принимаемых решений. В работе формализована задача поиска и подбора фрагментов знаний на основе сочетания семантических и эмбединговых представлений, предложена многоэтапная процедура отбора кандидатов, включающая фильтрацию по атрибутам, эмбединговый поиск, переупорядочивание, проверку ограничений и отбор по критерию разнообразия. Такой подход позволяет сочетать интерпретируемость онтологий с масштабируемостью и устойчивостью ANN-механизмов. Результатами работы являются модель цифровой нити аддитивного производства, подробное описание и система математического обеспечения этапа поиска и подбора фрагментов. Полученные результаты формируют основу для построения цифровой нити аддитивного производства, ориентированной на самообучающуюся базу знаний и непрерывное улучшение моделей.

Ключевые слова: цифровая нить, аддитивное производство, поддержка принятия решений, машинное обучение, экономическая эффективность.

Цитирование: Нефёдова, Л., 2025. Математическое обеспечение адаптивного проектирования в аддитивном производстве. *Sustainable Development and Engineering Economics* 4, 1. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.1>

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

© Нефёдова Л., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.1>

MATHEMATICAL MODELS FOR ADAPTIVE DESIGN IN ADDITIVE MANUFACTURING

Lyubov Nefedova* 

Research Institute of Applied Materials Science, Almaz-Antey Concern, St. Petersburg, Russia,
nefedova@goz.ru

*Corresponding author: nefedova@goz.ru

Abstract

The article examines the concept of the digital thread in additive manufacturing as a foundation for improving the economic efficiency of the production cycle through intelligent support at the design stage. A mathematical model and algorithmic procedure for the "Search and Selection of Knowledge Fragments" stage are proposed within the framework of the authors' development of the MAPE-K adaptive control model by incorporating the stages of search, reuse, and evaluation. It is shown that the most significant potential for increasing the productivity of additive manufacturing is concentrated at the design stage of digital product models and technological processes, where the application of ontological modeling and machine learning methods can significantly reduce labor intensity and improve the quality of decisions made. The study formalizes the task of searching and selecting knowledge fragments based on a combination of semantic and embedding representations. A multi-stage candidate selection procedure is proposed, including attribute filtering, embedding search, re-ranking, constraint validation, and selection based on diversity criteria. This approach allows combining the interpretability of ontologies with the scalability and robustness of ANN mechanisms. The results of the work include a model of the digital thread for additive manufacturing, a detailed description, and a system of mathematical support for the stage of searching and selecting fragments. The obtained results form the basis for building a digital thread for additive manufacturing, oriented towards a self-learning knowledge base and continuous model improvement.

Keywords: digital thread, additive manufacturing, decision support, machine learning, economic efficiency.

Citation: Nefedova, L., 2025. Mathematical models for adaptive design in additive manufacturing. Sustainable Development and Engineering Economics 4, 1. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.1>

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

© Nefedova L., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

Аддитивное производство (АП) обеспечивает принципиально новые возможности по сравнению с традиционными методами производства: благодаря послойному построению изделий оно позволяет реализовывать сложнейшие геометрии, создавать иерархические структуры и расширять функциональность деталей (Trovato et al., 2025). Однако такая свобода «трехмерной» печати требует качественно иных подходов к проектированию, что накладывает дополнительную трудоемкость на ранние стадии разработки (Trovato et al., 2025; Dinar & Rosen, 2017). В частности, в АП «проектирование» превращается в критический узел: отсутствие формальных руководств и накопленной базы знаний приводит к длительному «ручному» конструированию решений для новых изделий (Dinar & Rosen, 2017).

АП характерно высокой вариативностью материалов, технологических режимов и дизайнов (Design for Additive Manufacturing, DfAM), что делает повторное использование правил и параметров особенно важным. В этих условиях концепция цифровой нити – бесшовной интеграции данных и знаний по всему жизненному циклу продукта – приобретает особую важность. Цифровая нить объединяет информацию от этапа эскизного и детального проектирования через производство, эксплуатацию и утилизацию изделия (Abdel-Aty & Negri, 2024), устраняя информационные «силосы» внутри предприятия. Цифровая нить позволяет хранить, версионировать и автоматически извлекать проверенные фрагменты технологических цепочек и параметров, что в итоге сокращает время проектирования и число дорогостоящих итераций при выводе изделий в серию. Это дает предпосылки для автоматизации и ускорения проектирования, поскольку позволяет обращаться к накопленным данным и готовым решениям.

В исследовании ставится гипотеза о том, что организация цифровой нити, основанная на динамически обновляемой онтологии знаний АП и соответствующем математическом аппарате поиска, может существенно сократить трудоемкость этапа проектирования. Целью статьи является разработка системы математического обеспечения этапа проектирования в АП. Задачи статьи, позволяющие достичь поставленную цель, формулируются следующим образом: предложить модель цифровой нити АП, показывающую место этапа проектирования в жизненном цикле управления АП; предложить систему математического обеспечения этапа проектирования, позволяющую эффективно повторно использовать накопленные знания.

2. Обзор литературы

Из анализа обзоров и статей по вопросам актуальных тенденций в области автоматизации АП видно несколько устойчивых трендов:

- Интеграция цифровых двойников и цифровой нити. Цифровые двойники используются для реплики оборудования и процессов, а цифровая нить обеспечивает связность двойника с PLM/ERP/QMS-системами. Цифровые двойники в АП активно применяются для мониторинга, предсказания дефектов и адаптивного управления (Ben Amor et al., 2024).

- Машинное обучение и управление на основе данных. С 2018 г. машинное обучение стало шире применяться для предсказания формы плавления, дефектов, оптимизации параметров и суррогатного моделирования. Появляются обзоры, суммирующие применение классификации, регрессии, генеративных моделей и Bayesian/BO-методов в АП (Vashishtha et al., 2025; Snilders et al., 2020).

– Встраивание в циклы «в реальном времени» (closed-loop control). Растет практическая реализация систем, где цифровые двойники в сочетании с машинным обучением обеспечивают корректирующие воздействия в процессе (Nefedova, 2025).

– MLOps/ModelOps для промышленного цикла. Появление требований к инфраструктуре – ключевой практический тренд для промышленной применимости машинного обучения в АП (Vashishtha et al., 2025).

– Онтологии и стандартизация семантики. Инициативы вроде Industrial Ontologies Foundry (IOF) и работы по унифицированным онтологиям для производства направлены на решение проблем семантической интероперабельности, что критично для цифровой нити. Параллельно развиваются усилия по стандартизации форматов передачи геометрии/процессов (STEP-NC и др.) [tsapps.nist.gov].

– Безопасность и прослеживаемость данных. При многопартнерских цепочках поставки и в ответственных отраслях растет внимание к гарантиям происхождения и неизменности записей цифровой нити [MDPI].

– В работе проведен обзор ключевых публикаций (за 2018–2025 гг.) как в мировых, так и в российских источниках, касающихся цифровой нити, онтологий и машинного обучения в АП. Отдельно следует обратить внимание на следующие направления и работы:

– Xiao et al., 2024: обзор цифровой нити АП с точки зрения обмена данными и извлечения знаний. Авторы отмечают роль стандартов STEP-NC и онтологии для обеспечения интероперабельности и получения знаний в АП.

– Ko et al., 2021: предложен подход к построению правил проектирования АП на основе машинного обучения и онтологий (knowledge graph). Применен метод классификации (дерева решений) для получения данных по влиянию параметров лазерного селективного спекания на качество изготовленных изделий. В рамках этой методики машинное обучение извлекает новые знания о процессах печати, а онтология служит базой знаний для хранения как априорных, так и только что обнаруженных фактов.

– Kim et al., 2023: разработана онтология DfAM для АП методом послойного экструдирования. Онтология аккумулирует метаданные о материалах, процессах и геометрии, что позволяет автоматически подбирать оптимальные параметры и оборудование для заданных условий производства. Работа подчеркивает необходимость централизованного хранилища знаний экспертов для повторного использования опыта.

– Trovato et al., 2025: критический обзор использования ML в DfAM. Авторы показывают, что уже сегодня ML-инструменты активно применяются на разных стадиях конструирования – от определения параметров печати до управления процессом. Отмечено, что ML позволяет ускорять настройку многопараметрических задач проектирования (Trovato et al., 2025) и выступает вспомогательным средством для инжиниринга в АП.

Кроме того, рассмотрена русскоязычная литература по онтологиям АП (например, работы Дозорцева В.М., 2022; Финогеев Д.Ю. и др., 2020), где предлагаются ансамбли онтологических моделей для поддержки лазерного АП (описываются онтологии оборудования, материалов, технологических операций). Эти исследования подтверждают актуальность разработки формальных моделей знаний в АП.

Отдельные аспекты влияния автоматизации на эффективность АП описаны в более ранних работах автора (Nefedova, 2025; Ласкин и др., 2025; Нефедова и др., 2019).

3. Материалы и методы

Методологической основой настоящей работы является архитектурный подход к проектированию систем ИТ-поддержки процессов и систем (подходы консорциума The Open Group; Pin et al., 2021; Ильин и др., 2012; Козин и др., 2016). В частности, за основу была взята концепция цифровой нити как основополагающего звена архитектуры киберфизических систем, ярким примером которых является АП (Nefedova L., 2025) и идея цикла Monitor – Analyse – Plan – Execute – Knowledge (MAPE-K).

Термин «цифровая нить» обозначает сквозную информационную линию, которая связывает все артефакты жизненного цикла продукта (требования, CAD/CAE-модели, технологические рецепты, данные качества, эксплуатационные данные) и обеспечивает целостность «источника истины» для принятия решений и автоматизации процессов. Современные обзоры подчеркивают, что цифровая нить – это не просто набор форматов, а масштабируемая архитектура интеграции моделей и потоков данных, предназначенная для устранения информационных пробелов во всем PLM/ALM/IoT-ландшафте. Практически цифровая нить появилась как идея в оборонных проектах (DoD/USAF), где требовалась прослеживаемость от CAD до конечного изделия, и с тех пор ее содержание и практики быстро эволюционируют.

Концепция MAPE-K из области автономных вычислений (Kerhart & Chess, 2003) дает абстрактную архитектуру для систем самоадаптации и теперь широко применяется как модель референтного цикла для цифровых двойников и систем адаптивного управления в промышленности. MAPE-K задает контролируемую петлю: сенсоры → аналитика и детекция отклонений → план корректирующих действий → исполнение → база знаний (обновляемая модель). (Arcaini et al., 2015; Ben Halima et al., 2023; Zhang et al., 2024). Для АП это естественный каркас для реализации замкнутого цикла качества и адаптации технологических параметров.

В практическом воплощении для АП MAPE-K интегрируется с цифровой нитью так:

- Monitor: сбор мульти-сенсорных потоков (камеры, термопары, датчики мощности) и метаданных машин;
- Analyse: ML/физические модели для детекции аномалий, предсказания дефектов;
- Plan: оптимизатор/контроллер формирует корректировки параметров;
- Execute: система управления контролирует исполнение корректировок на печатной машине;
- Knowledge: результаты экспериментов и верификации обновляют онтологию/базу цифровой нити.

Важно подчеркнуть, что описанная интеграция цифровой нити и цикла MAPE-K распространяется не только на контур оперативного мониторинга и управления процессом печати, но и на этап проектирования изделия и технологической подготовки производства. В контексте интеллектуальной поддержки проектирования этап Knowledge аккумулирует не только эксплуатационные данные, но и параметры ранее реализованных конструктивных и

технологических решений, формируя основу для повторного использования знаний и семантического поиска инженерных шаблонов. Этапы *Analyse* и *Plan* в этом случае реализуются как процедуры оценки проектных альтернатив, выбора технологических маршрутов и параметрической оптимизации до запуска в производство. Таким образом, цифровая нить в сочетании с МАРЕ-К образует архитектурную основу не только для адаптивного управления производственным процессом, но и для интеллектуализации стадии проектирования, обеспечивая замкнутую обратную связь между разработкой изделия, моделированием и фактическими результатами его изготовления.

Представленный архитектурный каркас цифровой нити и цикла МАРЕ-К носит референтный характер и используется в настоящем исследовании как концептуальная основа для дальнейшей формализации. Он задает структурную логику взаимосвязи данных, моделей и управляющих воздействий, но не привязан к конкретным программным платформам или технологическим реализациям.

4. Результаты

По мотивам идеи цикла МАРЕ-К была предложена модель цифровой нити АП (рис. 1).

Более детальный алгоритм работы цифровой нити поддержки АП (рис. 1) описан ниже. Важно подчеркнуть, что основным предметом настоящей статьи является этап «Поиск и подбор фрагментов», связанный с задачей семантического вывода по онтологическому графу и формированием множества релевантных инженерных шаблонов. Описание остальных этапов цифровой нити приведено в укрупненном виде с целью задать контекст функционирования системы в целом и показать место этапа поиска в замкнутом цикле проектирования и производства. Детализация алгоритмических процедур последующих модулей выходит за рамки настоящей работы и рассматривается как часть общей референтной архитектуры.

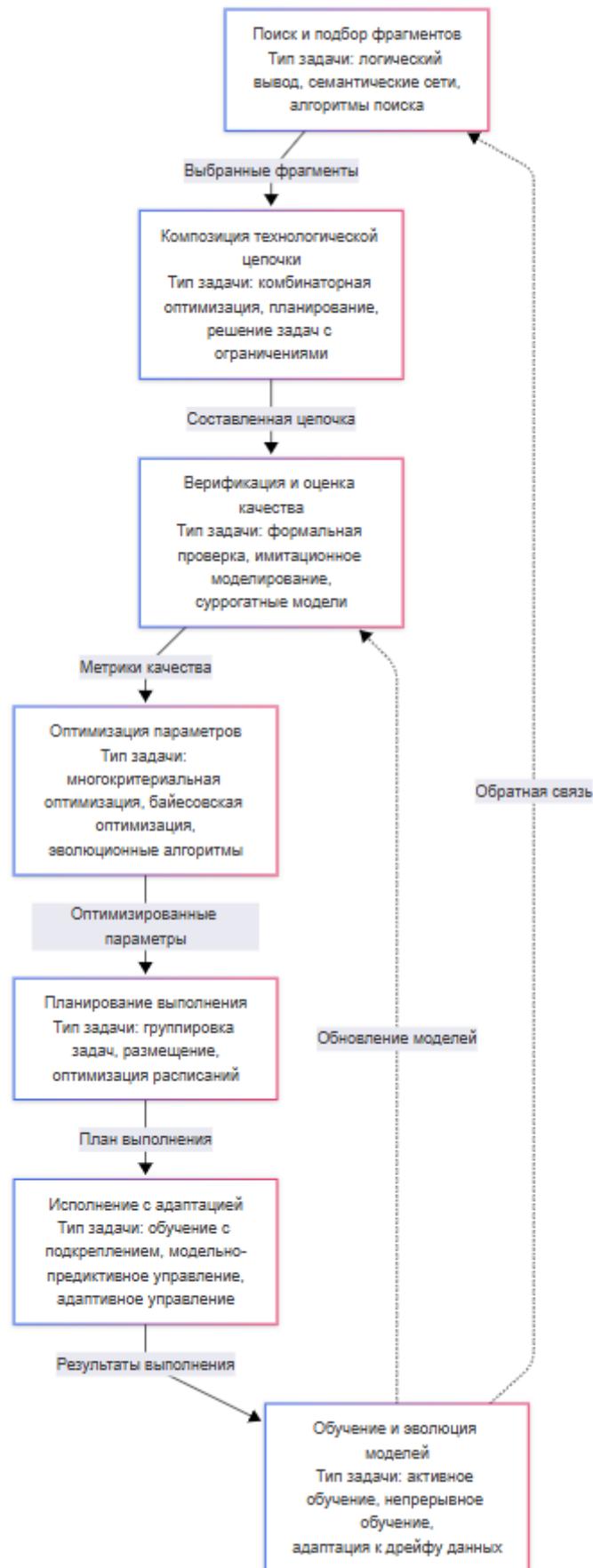


Рисунок 1. Модель цифровой нити аддитивного производства

Поиск и подбор фрагментов: по заданным требованиям проектирования выполняется логический запрос к онтологии (семантические сети). В качестве примера можно формализовать запрос SPARQL, извлекающий в базе ранее разработанные конструкции и принципы проектирования, удовлетворяющие новым условиям (Dinar & Rosen, 2017). Этот этап сводится к задаче вывода по графу знаний (семантического поиска).

Композиция технологической цепочки: найденные фрагменты комбинируются и собираются в единый производственный процесс. Это задача комбинаторной оптимизации и планирования: нужно расположить модули в правильной последовательности, учесть ограничения на ресурсы и совместимость. Например, если найдены готовые конструкции двух частей, система должна решить, как их соединить с учетом дизайна изделия. Выбор допустимой последовательности модулей осуществляется на основе совокупности критериев и ограничений, включающих: технологическую совместимость операций (материал, тип процесса, допустимые режимы), ресурсные ограничения (доступность оборудования и инструмента), временные ограничения (предельная длительность производственного цикла), экономические показатели (стоимость операций и переходов), а также требования к качественным характеристикам изделия. Формально задача композиции может быть представлена как задача поиска допустимого пути в ориентированном графе операций с ограничениями на вершины и ребра, где решение должно удовлетворять множеству жестких и мягких условий.

Верификация и оценка качества: на этом этапе производится анализ смоделированной сборки. На этапе верификации разграничиваются три типа процедур. Формальная проверка используется для контроля логической корректности конструкции и соблюдения технологических ограничений (геометрические допуски, минимальная толщина, совместимость материалов). Имитационное моделирование применяется для оценки физических характеристик изделия (прочность, деформации, температурные поля) на основе численных моделей. Суррогатные модели используются на этапе быстрой оценки, когда требуется оперативное прогнозирование показателей качества без проведения ресурсоемких расчетов. Выходными показателями этапа являются прогнозируемые значения ключевых метрик (масса, прочность, вероятность дефектов), а также индикаторы неопределенности. Если изделие не удовлетворяет критериям, алгоритм возвращается к предыдущим шагам.

Оптимизация параметров: когда структура изделия определена, проводится оптимизация технологических параметров (скорость печати, температура и т.д.) и геометрических параметров (толщина стенок, ориентация на платформе). Это многокритериальная задача: применяются эволюционные алгоритмы, байесовская оптимизация или методы многокритериальной оптимизации для достижения баланса между стоимостью, скоростью и качеством. В рамках предлагаемой модели оптимизация имеет иерархическую структуру. На первом уровне оптимизируются геометрические параметры изделия (ориентация, толщина стенок, структура заполнения), влияющие на физические характеристики. На втором уровне оптимизируются технологические параметры процесса (скорость сканирования, мощность лазера, шаг слоя), определяющие качество печати и вероятность дефектов. Совместная оптимизация применяется в случае тесной взаимозависимости параметров, однако в большинстве сценариев используется декомпозиционный подход, позволяющий снизить вычислительную сложность задачи.

Планирование выполнения: после окончательного проектирования формируются расписание задач и распределение ресурсов. Задача планирования учитывает группировку печатных заданий, загрузку машин, последовательность операций – классическая задача оптимизации расписаний.

Исполнение с адаптацией: начинается процесс печати. При необходимости система действует адаптивное управление и машинное обучение (например, обучение с подкреплением) для корректировки параметров в режиме реального времени на основе отклонений процесса. В рамках предложенной архитектуры адаптивное управление рассматривается как расширенный (но концептуально встроенный) элемент цифровой нити. Базовая реализация системы может функционировать в режиме офлайн-оптимизации без динамической корректировки параметров в процессе печати. Однако для высокоточных изделий адаптивный контур является рекомендуемым компонентом, обеспечивающим замыкание цикла MARE-K и переход от статического планирования к самоадаптирующейся кибер-физической системе. Таким образом, адаптивный модуль не является обязательным для минимальной конфигурации, но представляет собой целевой уровень зрелости архитектуры.

Обучение и эволюция модели: накапливаются новые данные о проделанных печатных заданиях. Система использует активное и непрерывное обучение для обновления моделей качества и расширения онтологии: новые конструкции и зависимости автоматически добавляются в базу. Согласно (Dinar & Rosen, 2017), в будущем возможны индукция новых правил и классификация «успешных» и «неуспешных» шаблонов проектирования (Trovato et al., 2025).

Возврат к предыдущим этапам инициируется при нарушении заданных критериев допустимости, таких как превышение пороговых значений дефектности, недостижение требуемых прочностных характеристик, превышение стоимости или времени изготовления. В зависимости от типа несоответствия алгоритм возвращается либо к этапу оптимизации параметров (если структура изделия допустима, но параметры требуют корректировки), либо к этапу композиции технологической цепочки (если выявлена структурная несовместимость или системная ошибка проектного решения). Таким образом, цифровая нить реализует управляемый итерационный процесс с различными точками возврата.

В предложенной модели этап поиска и подбора фрагментов является стартовым для других компонентов цифровой нити. Используя онтологию и накопленную базу решений, система переиспользует фрагменты знаний и объединяет их в технологическую цепочку изготовления, далее проверяет и оптимизирует ее параметры. Внедрение технологий интеллектуального поиска на эту стадию создает предпосылки для ускорения всего процесса АП. Под «фрагментом знаний» в алгоритмическом описании понимается формализованная сущность онтологического графа (шаблон, конструктивный принцип, технологический модуль), которая в математической модели представлена как элемент f_i . Для обеспечения гибридного поиска каждому фрагменту сопоставляется векторное представление, полученное функцией эмбединга. Таким образом, логический поиск по онтологии и ANN-поиск по эмбедингам являются двумя способами работы с одной и той же совокупностью фрагментов, представленными в символическом и векторном пространствах соответственно.

Ниже описан алгоритм реализации этапа «Поиск и подбор фрагментов» и соответствующее математическое обеспечение для описания ключевых зависимостей и вычисления

ключевых параметров данного этапа. Следует пояснить, что описан обобщенный алгоритм. Его конкретизация и детализация – это вопрос адаптации под конкретную задачу АП.

В предлагаемой модели используется гибридная схема поиска: онтологический граф обеспечивает выполнение строгих семантических ограничений и логический вывод (через SPARQL-запросы и правила совместимости), тогда как векторное пространство эмбедингов реализует поиск по смысловой близости и обобщение ранее наблюдаемых решений. Итоговый набор кандидатов формируется как объединение или пересечение результатов символического и векторного поиска с последующей агрегацией рангов. Такой подход позволяет сочетать интерпретируемость онтологий с масштабируемостью и устойчивостью ANN-механизмов.

Постановка задачи и обозначения

По входной спецификации задачи q (требования, ограничения и т.п.) найти в репозитории цифровой нити $F = \{f_1, \dots, f_N\}$ набор кандидатов SCF (обычно $|S| \leq K$), пригодных для последующей композиции и верификации, и выдать для каждого f_i оценку релевантности s_i и меру неопределенности σ_i . При выборе учитывать жесткие ограничения совместимости и желать разнообразия кандидатов.

Ключевые обозначения:

- q – входной запрос/спецификация (структурированный вектор и/или текст);
- $F = \{f_1, \dots, f_N\}$ – репозиторий фрагментов;
- Для каждого фрагмента f_i : a_i – вектор атрибутов; t_i – текстовое описание; o_i – онтологические метки; m_i – метрики прошлой успешности;
- v_q, v_i – эмбединги запроса и фрагмента соответственно;
- $\text{sim}(v_q, v_i)$ – мера схожести (например, косинус);
- s_i – итоговый скор релевантности фрагмента f_i ;
- σ_i – оценка неопределенности в s_i ;
- $C(\cdot)$ – система жестких ограничений.
- K – требуемое число выдаваемых кандидатов.

Цель формально можно записать как оптимизационную задачу:

$$E[U(q)], \quad C(q) = 0,$$

где $U(\cdot)$ – польза набора для дальнейшей композиции.

Этап «Поиск и подбор фрагментов» включает в себя последовательную реализацию следующих шагов:

1. Предварительная фильтрация

Идея: исключить очевидно несоответствующие фрагменты, сократить размер поисковой базы для последующих этапов.

Операции:

1) Булевы фильтры: например, требование наличия сертификата, разрешенного материала, максимальных размеров:

$$F_0 = \{f_i \in F | B_j(f_i, q) = 1 \quad \forall j \in J\},$$

где B_j – булевы предикаты жестких ограничений (например, $B_{material}(f_i, q) = 1$, если материал фрагмента совместим с требованием запроса).

2) Атрибутивная фильтрация (диапазонные проверки):

$$F_1 = \{f_i \in F_0 | a_i^k \in [L_k(q), U_k(q)] \quad \forall k \in K\},$$

где a_i^k – k -я числовая характеристика, L_k, U_k – допустимые границы, задаваемые q .

Результат: $F_{cand}^{(0)} = F_1$.

2. Поиск с использованием приближенных ближайших соседей (ANN-поиск)

Идея: поиск ближайших по семантике фрагментов с помощью эмбедингов; применяется приближенный поиск для скорости.

Представления:

$$v_q = \Phi(q), v_i = \Psi(t_i, a_i, o_i),$$

где Φ, Ψ – функторы преобразования текста/атрибутов/графов знаний (KG) в векторы. Итоговый вектор v_i можно строить как конкатенацию: $v_i = [v_i^{attr}, v_i^{text}, v_i^{kg}]$.

ANN-поиск:

$$F_{cand}^{(1)} = ANN_{kNN}(\{v_i | f_i \in F_{cand}^{(0)}\}, v_q, k_{ANN}),$$

где k_{ANN} – размер предварительного пула (обычно $100 \leq k_{ANN} \leq 1000$), ANN_{kNN} возвращает k_{ANN} элементов с наибольшей схожестью $sim(v_q, v_i)$.

Мера схожести: косинусная схожесть:

$$sim(v_q, v_i) = \frac{(v_q \cdot v_i)}{\|v_q\| \|v_i\|}.$$

3. Вычисление признаков

Идея: для каждого кандидата $f_i \in F_{cand}^{(1)}$ вычислить вектор признаков $\varphi(q, f_i)$, который затем подается на модель ранжирования.

Примеры признаков φ :

$p_1 = sim(v_q, v_i)$ – косинусная схожесть эмбедингов;

$p_2 = BP25(q, t_i)$ – BP25 – оценка текстового совпадения (нормированная);

$p_3 = 1[ontomatch]$ – булево совпадение по обязательным онтологическим критериям (например, требуемый класс присутствует у f_i);

$p_4 = m_i^{usage}$ – историческая частота использования;

$p_5 = m_i^{success}$ – историческая частота успешных применений валидированных кейсов;

$p_6 = age(f_i)$ – возраст версии, время с последней ревизии (негативно коррелирует);

$p_7 = compatibility_score(f_i, q)$ – мягкая мера совместимости (0,...,1);

$p_8 = certified_i$ – флаг сертификации.

Итог: $\varphi_i = \varphi(q, f_i) = [p_1, \dots, p_d]$

4. Переранжирование (повторная сортировка кандидатов)

Идея. На основе φ_i получить скалярный скор s_i и вероятность релевантности $P(rel|q, f_i)$.

Варианты моделей:

1. Логистическая модель:

$$P_i = P(q, f_i) = \sigma(\theta^T \varphi_i) = \frac{1}{1 + e^{-\theta^T \varphi_i}}$$

тогда $s_i = \log \frac{P_i}{1-P_i}$ или просто $s_i = P_i$.

2. Обучение ранжированию (Learning-to-rank, LTR): используются алгоритмы типа LambdaMART, RankNet, ListNet и т.п., обучаемые на парных/списковых релеванностях. Модель дает ранжированный список и скоры s_i .

3. Калибровка и неопределенность: получить калиброванный P_i и оценочную σ_i (например, через bootstrap или Bayesian Logistic Regression, где θ – случайная величина и $Var[P_i]$ вычисляется по апостериорному распределению).

5. Проверка ограничений

Идея: применить формальные проверки совместимости и ресурсных ограничений; это может быть представлено как ILP/CSP.

Вводятся бинарные переменные $x_i \in \{0,1\}$: $x_i = 1$, если фрагмент выбран.

Жесткие ограничения могут быть записаны как:

$$\sum_i r_i^{(k)} \cdot x_i \leq R^{(k)}, \quad \forall k \in K_{resources},$$

где $r_i^{(k)}$ – потребление ресурса k при применении f_i , $R^{(k)}$ – доступный ресурс.

Совместимость можно задать выражением:

$x_i + x_j \leq 1$, если f_i и f_j совместимы.

Требование сертификации можно задать:

$$x_i \leq certified_i.$$

Целевая функция – максимизация суммарного сора при ограничениях:

$$\sum_i s_i \cdot x_i, \quad A \cdot x \leq b.$$

6. Выбор с учетом разнообразия (оптимизация неповторяемости)

Идея: Топ-К по скору может быть тесно коррелированным (много «почти одинаковых» фрагментов). Требуется выбрать S с хорошим балансом между релевантностью и разнообразием.

Функция цели с штрафом за схожесть может быть представлена в виде:

$$F(S) = \sum_{i \in S} s_i - \eta \sum_{i \in S} \sum_{j \in S, j \neq i} sim(v_q, v_i), \quad A \cdot x \leq b,$$

где $\eta \geq 0$ – коэффициент штрафа за двойной учет схожести, $sim(v_q, v_i)$ – мера близости фрагментов.

7. Результирующий набор фрагментов (выход)

Каждый элемент в итоговой выдаче S содержит:

- идентификатор фрагмента id_i ;
- оценка s_i и вероятность P_i ;
- оценку неопределенности σ_i ;
- краткое объяснение (explain): вклад признаков φ_i в s_i ;
- метку совместимости (булевы метки), параметры прослеживаемости (*provenance* – версия, автор, время);
- рекомендованные параметры (если f_i содержит шаблон) и предполагаемый риск.

Формальное представление выхода:

$$Output = \{(f_i, s_i, P_i, \sigma_i, explain_i, provenance_i) | i \in S\}.$$

Выходной набор *Output* представляет собой структурированное множество фрагментов с метаданными (тип операции, входные/выходные параметры, ограничения совместимости), которое передается на этап композиции как множество допустимых вершин графа технологических модулей. На следующем этапе данные фрагменты интерпретируются как элементы ориентированного графа операций, из которого формируются допустимые маршруты с учетом зависимостей и ограничений. Тем самым обеспечивается формальная непрерывность между этапом поиска и этапом композиции технологической цепочки.

5. Обсуждение

Рассмотренный подход сочетает преимущества онтологической модели и методов машинного обучения. С одной стороны, онтология задает структурированное хранилище знаний: она формализует накопленный опыт проектирования АП и позволяет логически выводить релевантные решения. С другой стороны, машинное обучение добавляет «априори неизвестное» – извлечение новых закономерностей из данных процесса и адаптацию моделей под новые условия. Это подтверждают авторы (Ko et al., 2021): их фреймворк ML + граф знаний аккумулирует как априорные, так и только что извлеченные данные, а затем логически обрабатывает

их для генерации практических правил проектирования. Такая гибридность дает синергетический эффект: например, алгоритмы активного обучения могут автоматически дополнять онтологию новыми правилами и зависимостями (Dinar & Rosen, 2017; Ko et al., 2021).

Применение описанного подхода дает несколько существенных преимуществ:

– Экономия времени: автоматизированный поиск и переиспользование готовых фрагментов сокращает цикл проектирования; кроме того, ML-методы значительно ускоряют подбор сложных многопараметрических решений (Trovato et al., 2025).

– Повышение качества и надежности: применение DfAM-инструментов (в том числе семантических) снижает риск брака 3D-печатных изделий – как отмечено, использование методов DfAM уменьшает вероятность дефектов и отклонений (Trovato et al., 2025).

– Рост коэффициента повторного использования: хранилище знаний на основе онтологии обеспечивает повторное использование экспертных разработок и стандартных решений. Это уменьшает дублирование труда и дает выигрыш по цене из-за сокращения повторных конструирований (Kim et al., 2023). В сумме комбинированный подход приводит к снижению затрат на подготовку производства и повышению точности выпуска продукции.

Однако существуют и ограничения. Во-первых, развитие онтологии требует значительных усилий: сбор, разметка и экспертиза знаний – ресурсоемкая задача. Отсутствие единых стандартов данных для АП (хотя STEP-NC и OntoSTEP развиваются) затрудняет интеграцию разнородной информации. Во-вторых, цифровая нить и ML-инфраструктура требуют вложений: как отмечается в литературе, высокая стоимость технологий АП и их комплексности замедляет широкое внедрение (Trovato et al., 2025). Также накладно поддерживать актуальность модели – быстро меняющиеся материалы и процессы требуют постоянного обновления онтологии и переобучения ML-моделей.

Возможности дальнейших исследований включают автоматизацию обновления базы знаний (например, через онтологическое обучение), интеграцию цифровой нити с системами цифровых двойников, стандартизацию форматов данных для АП. Кроме того, перспективно использовать глубинное обучение для извлечения сложных паттернов дефектов и оптимизационных ландшафтов, а затем кодировать их в онтологию. Кооперация ML-подходов и онтологической инженерии, как показали работы (Ko et al., 2021; Dinar & Rosen, 2017), способна дать новые инструменты для DfAM – например, автоматически формировать и верифицировать дизайн-правила.

6. Заключение

В статье сформулирована и обоснована гипотеза о том, что эффективная цифровая нить на основе онтологии и ML может сократить этап проектирования в АП. В «Введении» мы подчеркнули особенности АП (сложные геометрии, расширенные возможности) и определили проектирование как узкое место. В результате обзора литературы (раздел «Методы») показано, что современные исследования активно развивают онтологии DfAM и ML-методы оптимизации. Модель цифровой нити (раздел «Результаты») описана структурно: она использует базу знаний (онтологию) на этапе поиска фрагментов, комбинирует их в технологическую цепочку, проводит верификацию и оптимизацию параметров. Для каждого шага предложены математические подходы (семантический поиск, комбинаторная оптимизация,

многокритериальные алгоритмы, планирование, контроль с адаптацией). Анализ показал, что такой подход теоретически дает выигрыш по времени и качеству изготовления.

Таким образом, поставленные во «Введении» задачи сформулировать эффективный алгоритм цифровой нити и оценить его преимущества реализованы на концептуальном уровне. Цифровая нить – фундаментальный элемент цифровой трансформации в АП: она обеспечивает связность данных/моделей на всем жизненном цикле и является предисловием для успешной интеграции цифрового двойника и машинного обучения в данную сферу. Цикл МАРЕ-К остается удобной архитектурной референцией для построения замкнутых адаптивных систем в АП. Его адаптация – модифицированный цикл, предложенный в настоящей статье – логически вытекает из потребности добавить этапы поиска и управления знаниями и инкрементальную эволюцию моделей. Для практического подтверждения необходимо дальнейшее экспериментальное исследование, включая создание реальной онтологии АП и ее интеграцию с ML-системой. Однако уже на этапе моделирования можно убедиться в реализуемости предложенной идеи: сочетание формализованного знания (онтологии) и извлекаемых из данных закономерностей (ML) обещает значительное упрощение проектирования изделий для 3D-печати.

Список литературы

- Abdel-Aty, T.A., Negri, E., 2024. Conceptualizing the digital thread for smart manufacturing: a systematic literature review. *Journal of Intelligent Manufacturing* 35, 3629–3653. <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02407-1>
- Arcaini, P., Riccobene, E., Scandurra, P., 2015. Modeling and Analyzing MAPE-K Feedback Loops for Self-Adaptation, in: 2015 IEEE/ACM 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems. Florence, pp. 13–23. <https://doi.org/10.1109/SEAMS.2015.10>
- Ben Amor, S., Elloumi, N., Eltaief, A., Louhichi, B., Alrasheedi, N.H., Seibi, A., 2024. Digital Twin Implementation in Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Processes* 12 (6), 1062. <https://doi.org/10.3390/pr12061062>
- Ben Halima, R., Hachicha, M., Jemal, A., Hadj Kacem, A., 2023. MAPE-K patterns for self-adaptation in cyber-physical systems. *The Journal of Supercomputing* 79, 4917–4943. <https://doi.org/10.1007/s11227-022-04828-2>
- Dinar, M., Rosen, D., 2017. A Design for Additive Manufacturing Ontology. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 17 (2), 021013. <https://doi.org/10.1115/1.4035787>
- Drobnjakovic, M., Kulvatunyou, B., Ameri, F., Will, Ch., Smith, B., Jones, A., 2022. The Industrial Ontologies Foundry (IOF) Core Ontology, in: *Formal Ontologies Meet Industry (FOMI) 2022*. Tarbes.
- Ilin, I., Levaniuk, D., Dubgorn, A., 2021. Assessment of Digital Maturity of Enterprises, in: Murgul, V., Pukhkal, V. (eds.) *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019*. EMMFT 2019. Springer, Cham, pp. 167–177. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_14
- Kephart, J.O., Chess, D.M., 2003. The Vision of Autonomic Computing. *Computer* 36 (1), 41–50. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1160055>
- Kim, S., Park, H., Park, Si., 2023. Design for additive manufacturing knowledgebase development and its application for material extrusion. *Journal of Mechanical Science and Technology* 37, 6193–6203. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-2412-3>
- Ko, H., Witherell, P., Lu, Y., Kim, S., Rosen, D.W., 2021. Machine learning and knowledge graph based design rule construction for additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 37, 101620. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101620>
- Nefedova, L., 2025. Modelling the Effect of Additive Technologies: Logistic Aspect, in: Ilin, I., Youzhong, M. (eds.) *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector*. Springer, Cham, pp. 139–153. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80710-7_11
- Snijders, R., Pileggi, P., Broekhuijsen, J., Verriet, J., Wiering, M., Kok, K., 2020. Machine Learning for Digital Twins to Predict Responsiveness of Cyber-Physical Energy Systems, in: *2020 8th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems*. Sydney, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/mscpes49613.2020.9133695>
- Trovato, M., Belluomo, L., Bici, M., Prist, M., Campana, F., Cicconi, P., 2025. Machine learning in design for additive manufacturing: A state-of-the-art discussion for a support tool in product design lifecycle. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 137, 2157–2180. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15273-9>
- Vashishtha, G., Chauhan, S., Zimroz, R., Yadav, N., Kumar, R., Gupta, M.K., 2025. Current Applications of Machine Learning in Additive Manufacturing: A Review on Challenges and Future Trends. *Archives of Computational Methods in Engineering* 32, 2635–2668. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10215-2>
- Xiao, J., Anwer, N., Huang, H., Bonnard, R., Eynard, B., Huang, C., Pei, E., 2024. Information exchange and knowledge discovery for additive manufacturing digital thread: a comprehensive literature review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 38 (8), 1052–1077. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2387768>
- Zhang, Q., Liu, J., Chen, X., 2024. A Literature Review of the Digital Thread: Definition, Key Technologies, and Applications. *Systems* 12 (3), 70. <https://doi.org/10.3390/systems12030070>
- Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленной автоматизации – на пике моды или наступившее будущее? // *Автоматизация в промышленности*. 2022. № 7. С. 3–14. <https://doi.org/10.25728/avtprom.2022.07.01>
- Ильин И.В., Широкова С.В., Эссер М. Управление проектами. Основы теории, методы, управление проектами в области информационных технологий. СПб.: Санкт-Петербургский Государственный Педагогический Университет, 2012.

- Козин Е.Г., Ильин И.В., Лёвина А.И. Сервис-ориентированный подход к анализу архитектурных решений // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2016. № 4 (246). С. 162–172. <https://doi.org/10.5862/JE.246.14>
- Ласкин М.Б., Нефёдова Л.А., Ильин И.В., Левина А.И. Оценка экономической эффективности аддитивного производства // Глобальный научный потенциал. 2025. № 7 (172). С. 421–426.
- Нефёдова Л.А., Лёвина А.И., Лепехин А.А. Цифровая трансформация предприятий с учётом автоматизации технологических процессов аддитивного производства // Экономика и предпринимательство. 2019. № 1 (102). С. 1206–1208.
- Финогеев Д.Ю., Решетникова О.П. Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 3 (86). С. 63–71.

References

- Abdel-Aty, T.A., Negri, E., 2024. Conceptualizing the digital thread for smart manufacturing: a systematic literature review. *Journal of Intelligent Manufacturing* 35, 3629–3653. <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02407-1>
- Arcaini, P., Riccobene, E., Scandurra, P., 2015. Modeling and Analyzing MAPE-K Feedback Loops for Self-Adaptation, in: 2015 IEEE/ACM 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems. Florence, pp. 13–23, <https://doi.org/10.1109/SEAMS.2015.10>
- Ben Amor, S., Elloumi, N., Eltaief, A., Louhichi, B., Alrasheedi, N. H., & Seibi, A., 2024. Digital Twin Implementation in Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Processes* 12 (6), 1062. <https://doi.org/10.3390/pr12061062>
- Ben Halima, R., Hachicha, M., Jemal, A., Hadj Kacem, A., 2023. MAPE-K patterns for self-adaptation in cyber-physical systems. *The Journal of Supercomputing* 79, 4917–4943. <https://doi.org/10.1007/s11227-022-04828-2>
- Dinar M., Rosen D., 2017. A Design for Additive Manufacturing Ontology. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 17 (2), 021013. <https://doi.org/10.1115/1.4035787>
- Dozortsev, V.M., 2022. Tsifrovyye dvoyniki v promyshlennoy avtomatizatsii – na pike mody ili nastupivshye budushcheye? [Digital Twins in Industrial Automation – Latest Trend or the Future?]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation in Industry]* 7, 3–14. <https://doi.org/10.25728/avtprom.2022.07.01>
- Drobnjakovic, M., Kulvatunyou, B., Ameri, F., Will, Ch., Smith, B., Jones, A., 2022. The Industrial Ontologies Foundry (IOF) Core Ontology, in: *Formal Ontologies Meet Industry (FOMI) 2022*. Tarbes.
- Finogeev, D.Yu., Reshetnikova, O.P., 2020. Additive Technologies in Modern Production of Precision Machine Building Parts. *Vestnik Saratov State Technical University* 3 (86), 63–71.
- Ilin, I., Levaniuk, D., Dubgorn, A., 2021. Assessment of Digital Maturity of Enterprises, in: Murgul, V., Pukhkal, V. (eds.) *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019*. EMMFT 2019. Springer, Cham, pp. 167–177. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_14
- Ilin, I.V., Shirokova, S.V., Esser, M., 2012. *Upravleniye proyektami. Osnovy teorii, metody, upravleniye proyektami v oblasti informatsionnykh tekhnologiy [Project Management. Fundamentals of Theory, Methods, and Project Management in Information Technology]*. St. Petersburg State Pedagogical University, St. Petersburg.
- Kephart J.O., Chess D.M., 2003. The Vision of Autonomic Computing. *Computer* 36 (1), 41–50. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1160055>
- Kim, S., Park, H., Park, Si., 2023. Design for additive manufacturing knowledgebase development and its application for material extrusion. *Journal of Mechanical Science and Technology* 37, 6193–6203. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-2412-3>
- Ko, H., Witherell, P., Lu, Y., Kim, S., Rosen, D.W., 2021. Machine learning and knowledge graph based design rule construction for additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 37, 101620. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101620>
- Kozin, E.G., Ilyin, I.V., Levina, A.I., 2016. Service-Oriented Approach for Architecture Solutions Analysis. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics* 4 (246), 162–172. <https://doi.org/10.5862/JE.246.14>
- Laskin, M.B., Nefedova, L.A., Ilyin, I.V., Levina, A.I., 2025. Evaluation of the Economic Efficiency of Additive Manufacturing. *Global Scientific Potential* 7 (172), 421–426.
- Nefedova, L., 2025. Modelling the Effect of Additive Technologies: Logistic Aspect, in: Ilin, I., Youzhong, M. (eds.) *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector*. Springer, Cham, pp. 139–153. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80710-7_11
- Nefedova, L.A., Levina, A.I., Lepekhn, A.A., 2019. Digital Transformation of Enterprises in View of the Automation of Technological Processes of Additive Production. *Journal of Economy and Entrepreneurship* 1 (102). С. 1206–1208.
- Trovato, M., Belluomo, L., Bici, M., Prist, M., Campana, F., Cicconi, P., 2025. Machine learning in design for additive manufacturing: A state-of-the-art discussion for a support tool in product design lifecycle. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 137, 2157–2180. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15273-9>
- Vashishtha, G., Chauhan, S., Zimroz, R., Yadav, N., Kumar, R., Gupta, M.K., 2025. Current Applications of Machine Learning in Additive Manufacturing: A Review on Challenges and Future Trends. *Archives of Computational Methods in Engineering* 32, 2635–2668. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10215-2>
- Xiao, J., Anwer, N., Huang, H., Bonnard, R., Eynard, B., Huang, C., Pei, E., 2024. Information exchange and knowledge discovery for additive manufacturing digital thread: a comprehensive literature review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 38 (8), 1052–1077. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2387768>
- Zhang, Q., Liu, J., Chen, X., 2024. A Literature Review of the Digital Thread: Definition, Key Technologies, and Applications. *Systems* 12 (3), 70. <https://doi.org/10.3390/systems12030070>

Статья поступила в редакцию 25.09.2025, одобрена после рецензирования 09.11.2025, принята к публикации 26.11.2025.

The article was submitted 25.09.2025, approved after reviewing 09.11.2025, accepted for publication 26.11.2025.

Информация об авторах:

1. Любовь Нефёдова, канд. техн. наук, без звания, доцент, Научно-исследовательский институт прикладного материаловедения Концерна ВКО «Алмаз – Антей», Санкт-Петербург, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-4334-0542>, nefedova@goz.ru

About authors:

1. Lyubov Nefedova, PhD, Research Institute of Applied Materials Science, Almaz-Antey Concern, Saint Petersburg, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4334-0542>, nefedova@goz.ru

Научная статья

УДК 519.876.2

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.2>

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Жанна Бурлутская*^{}, Полина Шарко^{}, Карина Лундаева^{}, Сальбек Бекетов^{}

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, zhanna.burlutskaya@spbpu.com, polina.sharko@spbpu.com, karina.lundaeva@spbpu.com, salbek.beketov@spbpu.com

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

Аннотация

Данная работа посвящена исследованию организационной системы технологических процессов, включая выделение типовых агентов, их целевых функций и стратегий взаимодействия друг с другом в процессе функционирования системы. В рамках данного исследования предлагается рассмотрение системы технологических процессов как сложной организационной системы междисциплинарной природы с соответствующими ей особенностями, включая множественность целевых функций, внутреннюю неопределенность, распределенное управление и ограниченную рациональность социальных элементов. Целью работы является разработка метода моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах. В ходе работы приводится описание типовых агентов системы технологических процессов, их задач и целевых функций. Результатом работы является онтологическая модель организационной системы технологических процессов, а также метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах на ее основе. В рамках апробации предложенного метода приводится разработка модели системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли. На следующих этапах исследования планируются разработка и программная реализация алгоритмов оптимизации технологических процессов на базе мультиагентного подхода, основанных на гибридном моделировании систем технологических процессов как совокупности процессов, моделируемых с использованием имитационного моделирования, и организационной системы интеллектуальных агентов, осуществляющих управление процессами, с использованием мультиагентного подхода.

Ключевые слова: сложные системы, мультиагентные взаимодействия, технологические процессы, имитационное моделирование, интеллектуальные агенты.

Цитирование: Бурлутская, Ж., Шарко, П., Лундаева, К., Бекетов, С., 2025. Метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах. *Sustainable Development and Engineering Economics* 4, 2. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.2>

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

© Бурлутская Ж., Шарко П., Лундаева К., Бекетов С., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.2>

METHOD OF MODELING MULTI-AGENT INTERACTIONS IN COMPLEX TECHNOLOGICAL PROCESSES

Zhanna Burlutskaya*, Polina Sharko, Karina Lundaeva, Salbek Beketov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, zhanna.burlutskaya@spbpu.com, polina.sharko@spbpu.com, karina.lundaeva@spbpu.com, salbek.beketov@spbpu.com

* Corresponding author: zhanna.burlutskaya@spbpu.com

Abstract

This work is devoted to the study of the organizational system of technological processes, including the identification of typical agents, their target functions and strategies for interacting with each other during the functioning of the system. Within the framework of this study, it is proposed to consider the system of technological processes as a complex organizational system of an interdisciplinary nature with its corresponding features, including a multiplicity of target functions, internal uncertainty, distributed management and limited rationality of social elements. The aim of the work is to develop a method for modeling multi-agent interactions in complex technological processes. In the course of the work, the description of typical agents of the technological process system, their tasks and target functions are given. The result of the work is an ontological model of the organizational system of technological processes, as well as a method for modeling multi-agent interactions in complex technological processes based on it. As part of the approbation of the proposed method, a model of the technological process system in the oil and gas industry is developed. At the next stages of the study, it is planned to develop and programmatically implement algorithms for optimizing technological processes based on a multi-agent approach based on hybrid modeling of technological process systems as a set of processes modeled using simulation modeling and an organizational system of intelligent agents managing processes using a multi-agent approach.

Keywords: complex systems, multi-agent interactions, technological processes, simulation modeling, intelligent agents.

Citation: Burlutskaya Z., Sharko P., Lundaeva K., Beketov S., 2025. Method of modeling multi-agent interactions in complex technological processes. Sustainable Development and Engineering Economics 4, 2. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.2>

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

© Burlutskaya, Z., Sharko, P., Lundaeva, K., Beketov, S., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

Системы технологических процессов относятся к сложным организационным системам междисциплинарной природы, в которых взаимодействует множество социальных и технических агентов с различными целями, функциями и стратегиями поведения. Для того чтобы принимать обоснованные управленческие решения по управлению технологическими процессами, необходимы специализированные инструменты поддержки принятия решений, способные учитывать ключевые особенности исследуемых систем: фактическую мультиагентность, множественность целевых функций, стохастическую природу многих параметров и внутреннюю неопределенность (Ayhan et al., 2015). Однако существующие инструменты зачастую оказываются ограниченными, так как опираются на упрощенные модели и не позволяют адекватно описывать всю полноту организационных и технологических взаимосвязей (Bolsunovskaya et al., 2022). Во-первых, они, как правило, игнорируют мультиагентную природу технологических процессов, предполагая наличие единого центра управления и не учитывая разнообразие участников и форм их взаимодействия (Voccella et al., 2020). Во-вторых, большинство инструментов ориентировано на оптимизацию по одному критерию, тогда как реальные системы требуют поиска баланса между множеством целевых функций (производительностью, затратами, безопасностью, устойчивостью функционирования и пр.) (Cerdea-Flores et al., 2022). В-третьих, используемые модели часто не способны адекватно описывать неопределенность, возникающую как вследствие неполноты исходных данных, так и из-за стохастической природы процессов (Gintsyak et al., 2023). Кроме того, они опираются преимущественно на статическое представление системы, что снижает возможность учитывать динамику и изменчивость внешней среды (Termine et al., 2023). Наконец, существующие инструменты редко интегрируют технические, организационные и экономические аспекты, что ограничивает их применимость в комплексных задачах управления. Соответственно, существует проблема ограниченности настоящих подходов к моделированию сложных производственных систем в части учета фактических мультиагентных взаимодействий и соответствующей множественности целевых функций, неопределенности и динамического характера системы (Gorodetskii, 2012). В рамках настоящего исследования предлагается рассматривать систему технологических процессов как организационную систему междисциплинарной природы. Система технологических процессов понимается как совокупность технических и социальных элементов, взаимодействующих для реализации организационно-экономических и технических процессов с целью достижения общих результатов (Burlankov et al., 2017). Такая система относится к классу организационных систем, так как представляет собой упорядоченную структуру, в которой согласованно функционируют дифференцированные и автономные части, реализуются процессы, обеспечивающие взаимодействие между ними, и объединяются люди, совместно достигающие целей на основе установленных процедур и правил (Tsoukanov & Voeva, 2012).

Рассмотрение системы технологических процессов в качестве организационной системы позволяет разработать онтологическую модель, описывающую типовых агентов и их взаимодействия, а также предложить метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах (Burlutskaya, 2024a; Foit, 2022).

Таким образом, целью исследования является разработка метода моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах на основе онтологической модели организационной системы технологических процессов.

Практическая апробация предложенного метода выполнена на примере моделирования системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли, что подтверждает его применимость для реальных отраслевых производственных систем.

2. Материалы и методы

В данном исследовании в качестве основного метода применяется моделирование мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах с использованием парадигмы моделирования интеллектуальных агентов BDI (Belief–Desire–Intention). Использование модели интеллектуальных агентов BDI направлено на формализацию поведения агентов на основе их убеждений (beliefs), целей (desires) и намерений (intentions) (Huber, 1999; Winikoff & Sidorenko, 2023), обеспечивая возможность учета мультиагентности, множественности целевых функций и динамического характера процессов.

Под интеллектуальными агентами понимаются агенты, обладающие собственным развивающимся набором знаний, стратегиями поведения и целями, способные воспринимать и реагировать на окружающую среду, а также создавать новые или усовершенствованные сценарии действий на основании знаний о предметной области и поведении других агентов (Chernyshev, 2023; Gorodetsky et al., 2019; Wooldridge, 2009). Системы интеллектуальных агентов, взаимодействующих как с внешней средой, так и друг с другом, представляют собой мультиагентные системы (MAS) (Ding et al., 2023; Calegari et al., 2021; Boissier et al., 2020).

Взаимодействие агентов, а значит, и их результирующее совместное поведение могут иметь различные цели (Sharko & Burlutskaya, 2025; Gorodetsky et al., 2019). Агенты MAS могут взаимодействовать с целью кооперативного решения некоторой общей сложной или крупномасштабной задачи. Другой характер взаимодействия агентов реализуется в случае, когда каждый агент имеет свои цели, однако он по каким-либо причинам не в состоянии решить задачу самостоятельно, а потому вынужден прибегать к помощи других агентов (Wooldridge, 2009).

Особенности общения агентов, в частности вариативность парадигм общения и тип взаимодействия, во многом определяются характеристиками реальных агентов. Так, для социальных агентов технологических процессов будет характерна ограниченная рациональность, возникающая из-за ограниченного доступа к информации о системе и несогласованности собственных и глобальных целей системы (Pospelov, 2025; Pospelov & Gintciak, 2025). Таким образом, в реальных системах характер взаимодействия агентов может меняться в зависимости от результатов анализа состояния среды интеллектуальными агентами.

Характер взаимодействия и парадигмы общения определяются в рамках моделирования организационной MAS (Sharko & Burlutskaya, 2025).

В рамках исследования рассматриваются такие типовые агенты технологических систем, как Предприятие, Производственное подразделение, Обслуживающее подразделение и Производственная площадка. Убеждения, желания и намерения в рамках централизованного и децентрализованного управления на уровне рассматриваемого агента каждого из выделенных агентов представлены далее.

Агент Предприятие представлен как ключевой управляющий элемент системы технологических процессов. Его убеждения включают набор обеспечивающих ресурсов, структурных

подразделений, текущие задачи подразделений, запросы на получение ресурсов, условия действующих договоров с ближним окружением, а также запросы и требования внешней среды (Leng et al., 2023; Wang et al., 2022; Rozs & Ando, 2020). Основные желания Предприятия направлены на максимизацию скорости выполнения условий договора с заказчиком, обеспечение высокого качества продукции и минимизацию расходов. В рамках централизованного управления агент реализует последовательность действий, включающую осведомление о ходе выполнения заказа, принятие решений о пересмотре условий договора совместно с заказчиком, уведомление руководителей структурных подразделений об изменениях сроков выполнения заказов, корректировку плана производства, определение и доведение задач до структурных подразделений, фиксирование и исполнение требований внешней среды, а также информирование о нарушениях со стороны участников коммуникации.

Агент Производственное подразделение функционирует как ключевой исполнитель внутри предприятия. Его убеждения включают текущие задачи подразделения и наличие ресурсов для их выполнения. Основные желания агента направлены на максимизацию скорости выполнения задач, поставленных предприятием, а также обеспечение высокого качества продукции. В рамках централизованного управления агент выполняет следующие действия: получает задание от предприятия, по запросу информирует предприятие о ходе выполнения заказа, уведомляет предприятие о потребностях подразделения, получает от работников запросы на изменение плана и корректирует план подразделения. При децентрализованном управлении агент сохраняет эти функции, но дополнительно координирует работу с другими структурными подразделениями: корректирует план с учетом результатов обсуждения, сообщает о потребностях другим подразделениям, по запросу информирует их о ходе выполнения заказа и запрашивает информацию о результатах работы других подразделений, что позволяет обеспечить более гибкую и согласованную работу системы в условиях изменяющейся среды (Leng et al., 2023; Wang et al., 2022; Rozs & Ando, 2020).

Агент Обслуживающее подразделение выполняет функции поддержки и обеспечения бесперебойного функционирования производственных процессов. Его убеждения включают задачи подразделения и наличие ресурсов для их выполнения. Основные желания направлены на максимизацию скорости выполнения задач подразделения. В рамках централизованного управления агент получает задание от предприятия, по запросу информирует предприятие о ходе выполнения задания, уведомляет предприятие о потребностях подразделения, получает запросы от работников на изменение плана и корректирует план подразделения (Leng et al., 2023; Wang et al., 2022; Rozs & Ando, 2020). При децентрализованном управлении агент дополнительно координирует свою работу с другими структурными подразделениями: корректирует план с учетом результатов обсуждения, сообщает о потребностях другим подразделениям, по запросу уведомляет их о ходе выполнения задания, принимает задания от других подразделений и запрашивает информацию о результатах их работы, что обеспечивает более гибкое и согласованное функционирование системы в условиях изменяющейся среды.

Агент Производственная площадка представляет собой локализованную единицу, на которой выполняются производственные операции и реализуются задачи, поставленные вышестоящими подразделениями. Его убеждения включают цели агента и поставленные задачи, а желания направлены на максимизацию скорости достижения этих целей и выполнения задач, поставленных следующему в иерархии работнику. В рамках централизованного управления агент получает задание, по запросу информирует вышестоящий уровень о ходе

выполнения, запрашивает изменения плана подразделения и индивидуального плана, а также выполняет рабочие задачи. При децентрализованном управлении агент дополнительно координирует свою работу с другими производственными площадками: сообщает им о ходе выполнения задания, обсуждает изменения плана подразделения, информирует о желании распределить задачи, принимает задания от других производственных площадок и участвует в совместном планировании, что обеспечивает гибкость и согласованность выполнения производственных операций в условиях изменяющейся среды.

На основе выделенных агентов можно сформировать типовую организационную модель системы технологических процессов, которая описывает взаимодействия между основными агентами системы (Leng et al., 2023; Wang et al., 2022; Rozs & Ando, 2020). Онтология служит основой для построения мультиагентной модели и обеспечивает формализованное представление знаний о системе (Kulvatunyou et al., 2022; May et al., 2022; Gorodetsky, 2015; Hadzic et al., 2009; Taha, 2005; Massart et al., 2003). Онтология представлена на рис. 1.

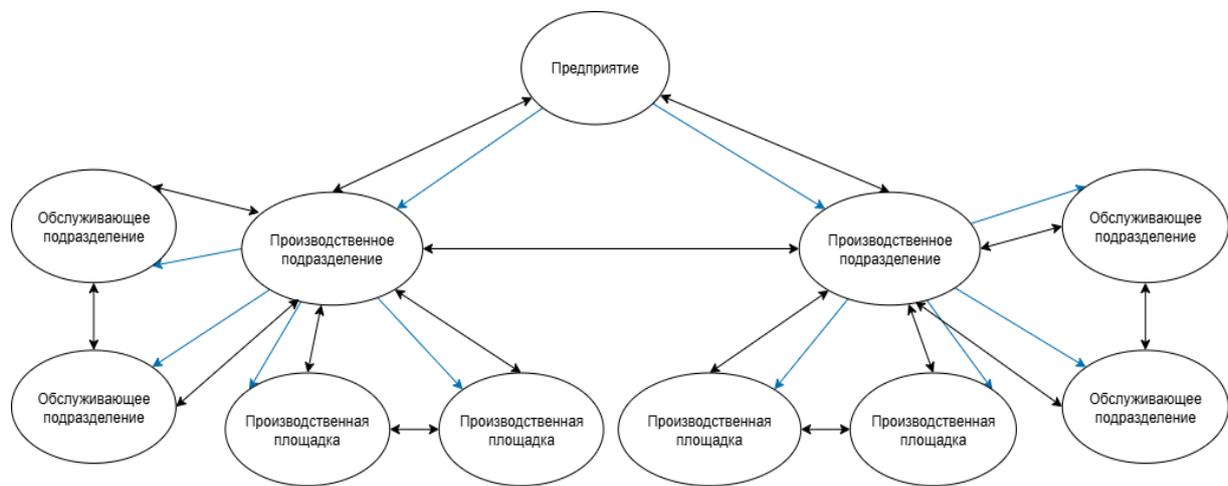


Рисунок 1. Онтологическая модель организационной системы технологических процессов

В модели Предприятие выступает центральным управляющим агентом. Предприятие передает Производственным подразделениям планы выполнения задач через управляющие воздействия (на рис.1. обозначены стрелками синего цвета). Осуществляется двусторонняя связь, Предприятие получает результаты от Производственных подразделений при осуществлении заданного плана. Предприятие также определяет ресурсы для выполнения планов, которые распределяются через соответствующее Обслуживающее подразделение, обеспечивающее Производственные подразделения необходимыми ресурсами – оборудованием, персоналом и прочими средствами – и рассчитывающее затраты на их предоставление.

Производственные подразделения, получив задания и планы от предприятия, передают Обслуживающему подразделению свои запросы на ресурсы. При этом перед передачей информации о ресурсах и задачах подразделения уточняют конкретные производственные планы с Производственными площадками, которые отвечают за выполнение конкретных операций. Производственные площадки могут обмениваться задачами и ресурсами между собой, однако такие взаимодействия осуществляются только при условии, что они приносят выгоду как для самих Производственных площадок, так и для соответствующего Производственного подразделения. Аналогично Производственные подразделения могут

координироваться между собой для обмена задачами и ресурсами, если это повышает эффективность выполнения планов.

Представленная онтология отражает не только иерархические управляющие связи (от предприятия к подразделениям и площадкам), но и двусторонние информационно-ресурсные потоки, обеспечивающие гибкость и адаптивность системы к изменениям внутренней и внешней среды.

Таким образом, выбор методов исследования обоснован их способностью формализовать рациональное поведение агентов в сложных системах, структурировать знания о системе с помощью онтологической модели и воспроизводимо моделировать сценарии работы технологических процессов с учетом мультиагентности, множественности целей и динамики системы (Burlutskaya, 2024a).

Определив типовую структуру системы технологических процессов, можно переходить к описанию метода моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах.

3. Результаты

3.1. Метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах

Метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах, основанный на онтологической модели организационной системы технологических процессов, заключается в последовательном выполнении следующих задач:

1. построении онтологической модели системы технологических процессов объекта исследования;
2. описании структуры интеллектуальных агентов МАС технологических процессов.

В рамках построения онтологической модели системы технологических процессов объекта исследования определяется организационная структура МАС технологических процессов. Для решения поставленной задачи необходимо:

1. определение набора моделируемых участников системы и их ролей;
2. определение возможностей участников для коммуникации (информирования) и управления.

В рамках описания структуры интеллектуальных агентов МАС технологических процессов определяется архитектура интеллектуальных агентов МАС. Для решения поставленной задачи необходимо описание индивидуальных возможностей и желаний участников в терминах одной из когнитивных архитектур или моделей когнитивных агентов.

Рассмотрим применение метода на примере системы технологических процессов нефтегазовой отрасли.

3.2 Моделирование мультиагентных взаимодействий для системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли

Описание системы (Sharko et al., 2025; Fedyaevskaya, et al., 2023; Bolsunovskaya et al., 2023):

- Задача предприятия: добыча нефти в регионе нефтедобычи;
- Технологические процессы: добыча нефти на скважинах региона;
- Вспомогательные процессы: проведение геолого-технических мероприятий (ГТМ), в частности ремонтно-изоляционных работ (РИР), гидравлического разрыва пласта (ГРП), обработки призабойной зоны (ОПЗ), и бурения;
- Ресурсы для реализации технологических процессов: скважины региона;
- Ресурсы для реализации вспомогательных процессов: бригады бурения региона, бригады ГТМ региона.

Организационная система мультиагентной модели системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли может быть представлена в виде структуры взаимодействия четырех агентов: Региона, Месторождения, Куста, Бригады (Sharko et al., 2025; Fedyaevskaya, et al., 2023). Иерархия взаимодействия в модели технологических процессов нефтегазовой отрасли строится от Региона к Месторождениям, от Месторождений к Кустам и от Кустов к Бригадам. Агенты Регион, Месторождение и Куст имеют схожую архитектуру и логику работы: они получают планы добычи, распределяют ресурсы и обмениваются информацией с агентами своего уровня для координации ресурсов. Агент Бригада рассматривается как ресурсный элемент системы; его основной задачей является минимизация логистических затрат при обеспечении сохранения или увеличения дебита. На рис. 2 представлена модель системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли.

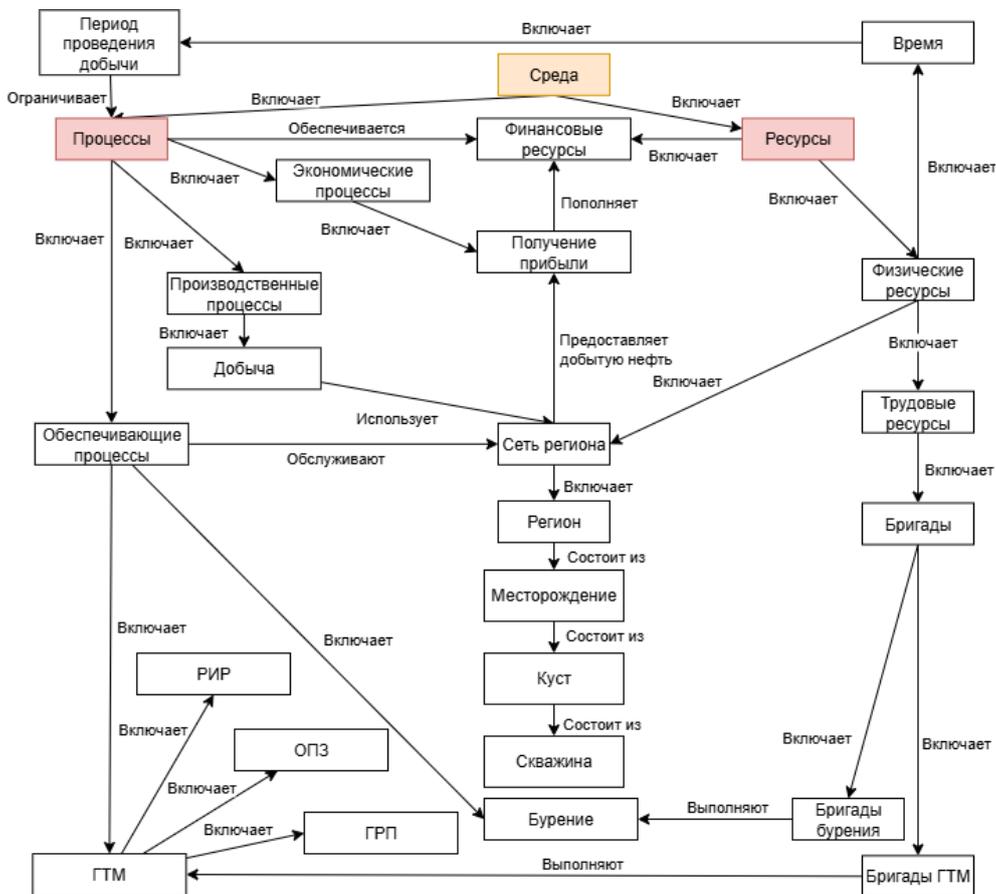


Рисунок 2. Модель организационной системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли

Опишем индивидуальные возможности и желания участников в терминах модели когнитивных агентов BDI, где убеждения отражают знания агента о системе, желания определяют его целевые функции, а намерения задают стратегии действий на основе этих знаний и целей (Caillou P. et al., 2017).

Так, агент Регион представляет собой верхний уровень управления и обладает убеждениями о доступных ресурсах, включая количество бригад каждого типа, количество месторождений, а также исторические данные по добыче и затратам. Его основное желание заключается в максимизации дебита, а намерения включают распределение бригад между месторождениями и вычисление ожидаемого дебита и затрат на добычу нефти.

Агент Месторождение учитывает доступные ресурсы, такие как количество бригад каждого типа, план добычи, расписание бурения и проведения ГТМ, количество и параметры кустов, прогнозируемый объем добычи при базовом сценарии и при обмене ресурсами, а также коэффициент альтруизма, определяющий соотношение целевых функций. Желания агента сосредоточены на максимизации общего дебита и выполнении или перевыполнении плана, а его намерения включают распределение бригад между кустами, взаимодействие с другими месторождениями для передачи или получения бригад, а также вычисление ожидаемого дебита и затрат.

Агент Куст ориентирован на выполнение расписания бурения и ГТМ, прогнозируемый объем добычи при базовом сценарии и при обмене ресурсами, параметры кустов и список скважин. Его желание также заключается в максимизации общего дебита, а намерения включают получение и передачу бригад другим кустам, а также расчет ожидаемого дебита и затрат на добычу.

На локальном уровне агент Бригада учитывает временные и финансовые затраты на перемещение и оборудование, координаты кустов, длительность операций, базовое расписание бурения и ГТМ, прогнозируемые объемы добычи и затраты при базовом сценарии, а также результаты прогнозирования при обмене операциями. Желания бригады направлены на максимизацию общего дебита при минимизации затрат на перемещение, а намерения включают получение и передачу операций другим бригадам и составление расписания выполнения операций.

Онтологическая модель описанной системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли представлена на рис. 3.

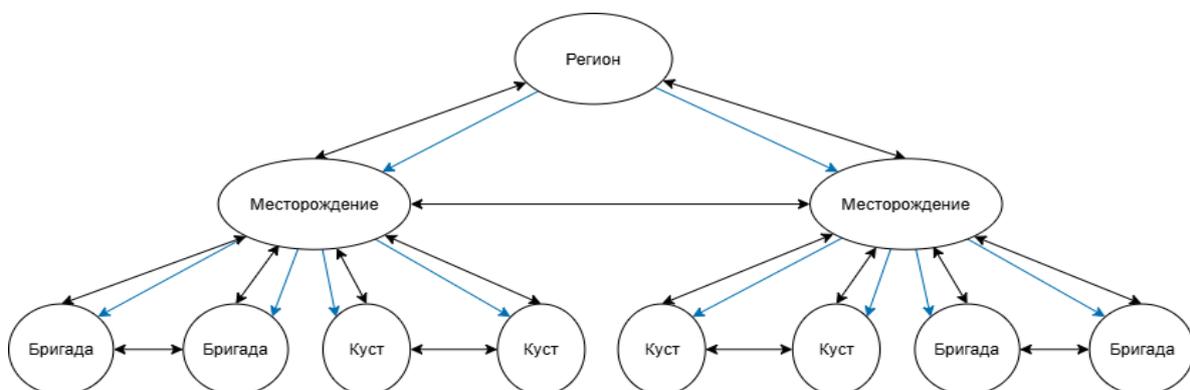


Рисунок 3. Онтологическая модель системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли

В разработанной модели предполагается, что интеллектуальные агенты реализуют попарное взаимодействие как с агентами своего уровня, так и с агентами верхнего и нижнего уровней в рамках иерархии управления. При описанной схеме взаимодействия реализуется итеративное уточнение сценариев разработки: от агентов верхнего уровня до агентов нижнего уровня (Burlutskaya, 2024b; Gintciak et al., 2025). Координация попарных взаимодействий агентов одного уровня осуществляется агентом верхнего уровня, что обеспечивает контроль выполнения глобальных целей системы.

Таким образом, Регион передает ресурсы Месторождениям в соответствии с первоначальным распределением, а также определяет планы по добыче. Для выполнения плана Месторождения запрашивают уточняющую информацию у Кустов, которые уточняют производственные планы с учетом фактической информации о состоянии инфраструктуры, темпах разработки запасов и других специфических особенностях. При необходимости Кусты запрашивают возможность коммуникации с другими агентами своего уровня для улучшения сценариев распределения. Аналогично строится взаимодействие Бригад.

4. Обсуждение

Концепция МАС не является новой – эта тема разрабатывается учеными различных мировых школ с XX века. Тем не менее тема не теряет актуальности: мультиагентность систем является фактором, усиливающим сложность самих систем, повышающим трудоемкость и снижающим адекватность моделирования и прогнозирования в таких системах (Gorodetsky et al., 2017; Rzevski & Skobelev, 2015). Мультиагентность в контексте данной работы можно описать как существование в системе двух и более агентов (принимающих стратегические решения элементов системы), что характерно для подавляющего большинства сложных технических систем с социальным компонентом, в которых мультиагентность обеспечивается участием множества людей в процессах управления и принятия решений (Gintsyak et al., 2023). Конфликты или несогласованные действия агентов в процессах таких систем могут приводить к существенному снижению эффективности функционирования систем по производственным и экономическим критериям. Следовательно, анализ мультиагентных взаимодействий, а также построение адекватных моделей таких взаимодействий, равно как и предложение практико-применимых методов поддержки принятия решений и информационного обеспечения процессов управления в МАС, требуют отдельного тщательного исследования, поскольку его результаты могут обеспечить прямое положительное влияние на экономическую деятельность (Chernyshev et al., 2023).

Результаты данного исследования расширяют практики в области разработки моделей сложных организационных систем междисциплинарной природы в части описания подхода к моделированию мультиагентных взаимодействий. На следующих этапах исследования планируются разработка и программная реализация алгоритмов оптимизации технологических процессов на базе мультиагентного подхода, основанных на гибридном моделировании систем технологических процессов как совокупности процессов, моделируемых с использованием имитационного моделирования, и организационной системы интеллектуальных агентов, осуществляющих управление процессами, с использованием мультиагентного подхода (Gintciak et al., 2025).

5. Заключение

В рамках данной работы приводится описание метода моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах на основе онтологической модели организационной системы технологических процессов. В ходе работы приводится описание типовых агентов системы технологических процессов, их задач и целевых функций. Результатом работы являются онтологическая модель организационной системы технологических процессов, а также метод моделирования мультиагентных взаимодействий в сложных технологических процессах на ее основе. В рамках апробации предложенного метода приводится описание мультиагентных взаимодействий для системы технологических процессов в нефтегазовой отрасли.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (соглашение № 075-15-2025-210 от 04 апреля 2025).

Список литературы

- Ayhan, M.B., Aydin, M.E., Öztemel, E., 2015. A multi-agent based approach for change management in manufacturing enterprises. *Journal of Intelligent Manufacturing* 26, 975–988. <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0794-2>
- Boccella, A.R., Centobelli, P., Cerchione, R., Murino, T., Riedel, R., 2020. Evaluating Centralized and Heterarchical Control of Smart Manufacturing Systems in the Era of Industry 4.0. *Applied Sciences* 10 (3), 755. <https://doi.org/10.3390/app10030755>
- Boissier, O., Bordini, R.H., Hübner, J.F., Ricci, A., 2020. Multi-agent oriented programming: programming multi-agent systems using JaCaMo. Mit Press, Saint-Etienne.
- Caillou, P., Gaudou, B., Grignard, A., Truong, C.Q., Taillandier, P., 2017. A Simple-to-Use BDI Architecture for Agent-Based Modeling and Simulation, in: Jager, W., Verbrugge, R., Flache, A., de Roo, G., Hoogduin, L., Hemelrijk, C. (eds.). *Advances in Social Simulation 2015*. Springer, Cham, pp. 15–28. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47253-9_2
- 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>
- Cerda-Flores, S.C., Rojas-Punzo, A.A., Nápoles-Rivera, F., 2022. Applications of Multi-Objective Optimization to Industrial Processes: A Literature Review. *Processes* 10 (1), 133. <https://doi.org/10.3390/pr10010133>
- Chernyshev, S.A., 2023. Problemy multiagentnykh sistem i vozmozhnye puti ikh resheniya [Problems of multi-agent systems and possible solutions]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie [Bulletin of the Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis and Management]* (3), 103–113. (In Russian).
- Ding, H., Zhuang, C., Liu, J., 2023. Extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *Automation in Construction* 153, 104958. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104958>
- Fedyavskaya, D.E., Burlutskaya, Z.V., Gintciak, A.M., Dixit, S., 2023. Hierarchical Cybernetic Model of Oil Production Enterprise with Distributed Decision-Making Centers, in: Bencsik, A., Kulachinskaya, A. (eds.). *Digital Transformation: What is the Company of Today?*. Springer, Cham, pp. 21–34. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46594-9_2
- Foit, K., 2022. Agent-based Modelling of Manufacturing Systems in the Context of “Industry 4.0”. *Journal of Physics: Conference Series* 2198 (1), 012064. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2198/1/012064>
- Gorodetsky, V., Kozhevnikov, S., Novichkov, D., Skobelev, P., 2019. The Framework for Designing Autonomous Cyber-Physical Multiagent Systems for Adaptive Resource Management, in: Mařík, V., Kadera, P., Rzevski, G., Zoitl, A., Anderst-Kotsis, G., A Min Tjoa, Khalil, I. (eds.) *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>
- Hadzic, M., Wongthongtham, P., Dillon, Th., Chang, E., 2009. *Ontology-Based Multi-Agent Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01904-3>
- Huber M.J., 1999. JAM: A BDI-theoretic mobile agent architecture, in: AGENTS '99: Proceedings of the third annual conference on Autonomous Agents, pp. 236–243. <https://doi.org/10.1145/301136.301202>
- Kulvatunyou, B., Drobnjakovic, M., Ameri, F., Will, C., Smith, B., 2022. The Industrial Ontologies Foundry (IOF) Core Ontology, in: *Formal Ontologies Meet Industry (FOMI) 2022*. Tarbes.
- Leng, J., Sha, W., Lin, Z., Jing, J., Liu, Q., Chen, X., 2023. Blockchain smart contract pyramid-driven multi-agent autonomous process control for resilient individualised manufacturing towards Industry 5.0. *International Journal of Production Research* 61 (13), 4302–4321. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2089929>
- Massart, D.L., Vandeginste, B.G.M., Deming, S.N., Michotte, Y., Kaufman, L., 2003. Operations Research, in: *Data Handling in Science and Technology*. Elsevier, pp. 419–435.
- May, M.C., Kiefer, L., Kuhnle, A., Lanza, G., 2022. Ontology-Based Production Simulation with OntologySim. *Applied Sciences* 12 (3), 1608. <https://doi.org/10.3390/app12031608>
- Rozs, R., Ando, M., 2020. Collaborative Systems, Operation and Task of the Manufacturing Execution Systems in the 21st Century Industry. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 64 (1), 51–66. <https://doi.org/10.3311/PPme.14413>

- Sharko, P.A., Burlutskaya, Z.V., Zubkova, D.A., Gintciak, A.M., Pospelov, K.N., 2025. AI-Supported Decision Making in Multi-Agent Production Systems Using the Example of the Oil and Gas Industry. *Applied Sciences* 15 (10), 5366. <https://doi.org/10.3390/app15105366>
- Taha, H.A., 2005. *Operations Research: An Introduction*, 7th ed. Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Termine, A., Antonucci, A., Primiero, G., Facchini, A., 2023. Imprecise Probabilistic Model Checking for Stochastic Multi-agent Systems. *SN Computer Science* 4 (5), 443. <https://doi.org/10.1007/s42979-023-01817-x>
- Wang, J., Hong, Y., Wang, J., Xu, J., Tang, Y., Han, Q. L., Kurths, J., 2022. Cooperative and competitive multi-agent systems: From optimization to games. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 9 (5), 763–783. <https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105506>
- Winikoff, M., Sidorenko G., 2023. Evaluating a Mechanism for Explaining BDI Agent Behaviour, in: *Explainable and Transparent AI and Multi-Agent Systems (EXTRAAMAS 2023)*. Springer, Cham, pp. 18–37. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40878-6_2
- Wooldridge, M.J., 2009. *An Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons Publ., Chichester.
- Болсуновская М.В., Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Петряева А.А., Зубкова Д.А., Успенский М.Б., Сеledgeва И.А. Возможности применения гибридного подхода в моделировании социально-экономических и социотехнических систем // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2022. № 3. С. 73–86. <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2022/3/73-86>.
- Болсуновская М.В., Гинцяк А.М., Федяевская Д.Э., Петряева А.А., Бурлуцкая Ж.В. Комплексное моделирование процессов нефтедобычи: аналитический обзор. *Автоматизация и информатизация ТЭК* // 2023. № 2 (595). С. 51–62. [https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-2\(595\)-51-62](https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-2(595)-51-62)
- Бурланков С.П., Бурланков П.С., Скворцов А.О. Основные понятия и классификация социотехнических, технико-экономических и социально-экономических систем // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки*. 2017. № 2 (42). С. 169–183. <https://doi.org/10.21685/2072-3016-2017-2-17>
- Бурлуцкая Ж.В. Возможности применения мультиагентного подхода для задач составления производственного расписания // *Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXVIII Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1*. СПб.: Политех-Пресс, 2024. С. 507–513. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id24-489>
- Бурлуцкая Ж.В. Перспективы применения мультиагентного подхода для моделирования организационных систем. *Управление инновациями в условиях цифровой трансформации: сборник научных трудов Всероссийской студенческой учебно-научной конференции*. СПб.: Политех-Пресс, 2024. С. 95–99.
- Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Пospelov К.Н., Ватаманюк И.А. Применение мультиагентного подхода для формирования расписания в распределенных производственных системах // *Современные подходы в системном инжиниринге и цифровом моделировании сложных производственных систем: сборник трудов I Всероссийской научно-практической конференции*. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. С. 18–22. DOI 10.18720/SPBPU/2/id25-181.
- Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Федяевская Д.Э., Пospelov К.Н., Ракова В.В. Цифровое моделирование социотехнических и социально-экономических систем: монография. СПб.: Политех-Пресс, 2023. 164 с.
- Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2012. Т. 51. № 2. С. 256–281.
- Городецкий В.И., Бухвалов О.Л., Скобелев П.О. Современное состояние и перспективы индустриальных применений многоагентных систем // *Управление большими системами*. 2017. № 66. С. 94–157.
- Пospelov К.Н. Метод оценки ограниченной рациональности агентов в задачах управления инновационными проектами // *Управление инновациями в условиях цифровой трансформации: сборник трудов IV всероссийской студенческой учебно-научной конференции*. СПб.: Политех-Пресс, 2025. С. 156–161. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id25-300>
- Пospelov К.Н., Гинцяк А.М. Кибернетическая формализация задач управления с учетом ограниченной рациональности в организационных системах // *Интеллектуальная инженерная экономика и Индустрия 6.0 (ИНПРОМ-2025): сборник трудов международной научно-практической конференции: в 2 т. Т. 2*. СПб.: Политех-Пресс, 2025. С. 492–495. <https://doi.org/10.18720/IEP/2025.2/134>
- Ржевский Г.А., Скобелев П.О. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями / пер. с англ. Самара: Офорт, 2015. 290 с.
- Цуканов М. А., Боева Л. М., 2012. Мультиагентная система поддержки принятия решений по оперативному планированию и технологической координации сложноструктурированных производственных систем // *Управление большими системами*. 2012. № 39. С. 254–263.
- 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): сборник трудов международной научно-практической конференции: в 2 т. Т. 2*. СПб.: Политех-Пресс, 2025. С. 523–526. <https://doi.org/10.18720/IEP/2025.2/142>

References

- Ayhan, M.B., Aydin, M.E., Öztemel, E., 2015. A multi-agent based approach for change management in manufacturing enterprises. *Journal of Intelligent Manufacturing* 26, 975–988. <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0794-2>
- Boccella, A.R., Centobelli, P., Cerchione, R., Murino, T., Riedel, R., 2020. Evaluating Centralized and Heterarchical Control of Smart Manufacturing Systems in the Era of Industry 4.0. *Applied Sciences* 10 (3), 755. <https://doi.org/10.3390/app10030755>
- Boissier, O., Bordini, R.H., Hübner, J.F., Ricci, A., 2020. Multi-agent oriented programming: programming multi-agent systems using JaCaMo. Mit Press, Saint-Etienne.
- Bolsunovskaya, M.V., Gintciak, A.M., Burlutskaya, Z.V., Petryeva, A.A., Zubkova, D.A., Uspenskiy, M.B., Seledtsova, I.A., 2022. The Opportunities of Using a Hybrid Approach for Modeling Socio-Economic and Sociotechnical Systems. *Proceedings of VSU, Series: Systems Analysis and Information Technologies* 3, 73–86. <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2022/3/73-86>
- Bolsunovskaya M.V., Gintciak A.M., Fedyaevskaya D.E., Petryaeva A.A., Burlutskaya Zh.V., 2023. Complex modeling of the oil production processes: analytical review. *Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex* 2 (595), 51–62. [https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-2\(595\)-51-62](https://doi.org/10.33285/2782-604X-2023-2(595)-51-62)
- Burlankov S.P., Burlankov P.S., Skvortsov A.O., 2017. Basic Concepts and Classification of Socio-Technical, Techno-Economic and Socio-Economic Systems. *University proceedings. Volga region. Social sciences* 2 (42), 169–183. <https://doi.org/10.21685/2072-3016-2017-2-17>

- Burlutskaya Zh.V., 2024a. The Prospects for the Application of a Multi-Agent Approach to Modeling Organizational Systems, in: *Innovation Management in the Context of Digital Transformation: Proceedings of the 3d All-Russian Student Educational and Scientific Conference*. Politekh-Press, St. Petersburg, pp. 95–99.
- Burlutskaya Zh.V., 2024b. The Possibilities of Using a Multi-Agent Approach for Production Scheduling Tasks, in: *Sistemnyy analiz v proyektirovani i upravlenii [Systems analysis in design and management]* 1. Politekh-Press, St. Petersburg, pp. 507–513. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id24-489>
- Caillou, P., Gaudou, B., Grignard, A., Truong, C.Q., Taillandier, P., 2017. A Simple-to-Use BDI Architecture for Agent-Based Modeling and Simulation, in: Jager, W., Verbrugge, R., Flache, A., de Roo, G., Hoogduin, L., Hemelrijk, C. (eds.). *Advances in Social Simulation 2015*. Springer, Cham, pp. 15–28. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47253-9_2
- 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>
- Cerda-Flores, S.C., Rojas-Punzo, A.A., Nápoles-Rivera, F., 2022. Applications of Multi-Objective Optimization to Industrial Processes: A Literature Review. *Processes* 10 (1), 133. <https://doi.org/10.3390/pr10010133>
- 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>
- Fedyavskaya, D.E., Burlutskaya, Z.V., Gintciak, A.M., Dixit, S., 2023. Hierarchical Cybernetic Model of Oil Production Enterprise with Distributed Decision-Making Centers, in: Bencsik, A., Kulachinskaya, A. (eds.). *Digital Transformation: What is the Company of Today?*. Springer, Cham, pp. 21–34. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46594-9_2
- Foit, K., 2022. Agent-based Modelling of Manufacturing Systems in the Context of “Industry 4.0”. *Journal of Physics: Conference Series* 2198 (1), 012064. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2198/1/012064>
- Gintsyak, A.M., Burlutskaya, Zh.V., Fedyavskaya, D.E., Pospelov, K.N., Rakova, V.V., 2023. Digital Modeling of Sociotechnical and Socio-economic Systems. Politekh-Press, St. Petersburg.
- Gintciak, A.M., Burlutskaya, Zh.V., Pospelov, K.N., Vatamaniuk, I.V., 2025. The Use of a Multi-agent Approach to Create Schedules in Distributed Production, in: *Modern Approaches in Systems Engineering and Digital Modelling of Complex Production Systems: Proceedings I of the National scientific and practical conference*. Peter the Great Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, pp. 18–22. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id25-181>
- Gorodetskii, V.I., 2012. Self-organization and Multiagent Systems: I. Models of Multiagent Self-organization. *Journal of Computer and Systems Sciences International* 51 (2), 256–281.
- Gorodetsky, V.I., Bukhvalov, O.L., Skobelev, P.O., 2017. Industrial Applications of Multi-agent Systems: Current State and Prospects. *Upravlenie Bol'shimi Sistemami* 66, 94–157.
- Gorodetsky, V., Kozhevnikov, S., Novichkov, D., Skobelev, P., 2019. The Framework for Designing Autonomous Cyber-Physical Multiagent Systems for Adaptive Resource Management, in: Mařík, V., Kadera, P., Rzevski, G., Zoitl, A., Anderst-Kotsis, G., A Min Tjoa, Khalil, I. (eds.) *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>
- Hadzic, M., Wongthongtham, P., Dillon, Th., Chang, E., 2009. *Ontology-Based Multi-Agent Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01904-3>
- Huber M.J., 1999. JAM: A BDI-theoretic mobile agent architecture, in: *AGENTS '99: Proceedings of the third annual conference on Autonomous Agents*, pp. 236–243. <https://doi.org/10.1145/301136.301202>
- Kulvatunyou, B., Drobnyakovic, M., Ameri, F., Will, C., Smith, B., 2022. The Industrial Ontologies Foundry (IOF) Core Ontology, in: *Formal Ontologies Meet Industry (FOMI) 2022*. Tarbes.
- Leng, J., Sha, W., Lin, Z., Jing, J., Liu, Q., Chen, X., 2023. Blockchain smart contract pyramid-driven multi-agent autonomous process control for resilient individualised manufacturing towards Industry 5.0. *International Journal of Production Research* 61 (13), 4302–4321. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2089929>
- Massart, D.L., Vandeginste, B.G.M., Deming, S.N., Michotte, Y., Kaufman, L., 2003. *Operations Research*, in: *Data Handling in Science and Technology*. Elsevier, pp. 419–435.
- May, M.C., Kiefer, L., Kuhnle, A., Lanza, G., 2022. Ontology-Based Production Simulation with OntologySim. *Applied Sciences* 12 (3), 1608. <https://doi.org/10.3390/app12031608>
- Pospelov, K.N., 2025. Method for Assessing Bounded Rationality of Agents in Innovation Project Management Problems, in: *Innovation Management IN THE Context OF Digital Transformation: Conference proceedings of the IV National student educational and scientific conference*. Politekh-Press, St. Petersburg, pp. 156–161. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id25-300>
- Pospelov, K.N., Gintciak, A.M., 2025. Cybernetic Formalization of Management Tasks with Bounded Rationality in Organizational Systems, in: *Intelligent Engineering Economics and Industry 6.0 (IEEI_6.0_INPROM): Proceedings of the international scientific and practical conference: in 2 vols. Vol. 2*. Politekh-Press, St. Petersburg, pp. 492–495. <https://doi.org/10.18720/IEP/2025.2/134>
- Rozs, R., Ando, M., 2020. Collaborative Systems, Operation and Task of the Manufacturing Execution Systems in the 21st Century Industry. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 64 (1), 51–66. <https://doi.org/10.3311/PPme.14413>
- Rzevski, G., Skobelev, P. 2015. *Managing Complexity*. Ofort, Samara.
- Sharko, P. A., Burlutskaya Z.V. 2025. Approach to Choosing the Organizational Structure of Agents in Modeling Complex Organizational Systems, in: *Intelligent Engineering Economics and Industry 6.0 (IEEI_6.0_INPROM): Proceedings of the international scientific and practical conference: in 2 vols. Vol. 2*. Politekh-Press, St. Petersburg, pp. 523–526. <https://doi.org/10.18720/IEP/2025.2/142>
- Sharko, P.A., Burlutskaya, Z.V., Zubkova, D.A., Gintciak, A.M., Pospelov, K.N., 2025. AI-Supported Decision Making in Multi-Agent Production Systems Using the Example of the Oil and Gas Industry. *Applied Sciences* 15 (10), 5366. <https://doi.org/10.3390/app15105366>
- Taha, H.A., 2005. *Operations Research: An Introduction*, 7th ed. Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Termine, A., Antonucci, A., Primiero, G., Facchini, A., 2023. Imprecise Probabilistic Model Checking for Stochastic Multi-agent Systems. *SN Computer Science* 4 (5), 443. <https://doi.org/10.1007/s42979-023-01817-x>

- Tsoukanov M., Boeva L., 2012. Multiagent System of Decision Support for Operational Control and Technological Coordination of Distributed Manufacture with Complex Structure. *Upravlenie Bol'shimi Sistemami* 39, 254–263.
- Wang, J., Hong, Y., Wang, J., Xu, J., Tang, Y., Han, Q. L., Kurths, J., 2022. Cooperative and competitive multi-agent systems: From optimization to games. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 9 (5), 763–783. <https://doi.org/10.1109/JAS.2022.105506>
- Winikoff, M., Sidorenko G., 2023. Evaluating a Mechanism for Explaining BDI Agent Behaviour, in: *Explainable and Transparent AI and Multi-Agent Systems (EXTRAAMAS 2023)*. Springer, Cham, pp. 18–37. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40878-6_2
- Wooldridge, M.J., 2009. *An Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons Publ., Chichester.

Статья поступила в редакцию 20.11.2025, одобрена после рецензирования 04.12.2025, принята к публикации 11.12.2025

The article was submitted 20.11.2025, approved after reviewing 04.12.2025, accepted for publication 11.12.2025.

Информация об авторах

1. Жанна Бурлуцкая, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0000-0002-5680-1937>, zhanna.burlutskaya@spbpu.com
2. Полина Шарко, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0006-4775-5189>, polina.sharko@spbpu.com
3. Карина Лундаева, Аналитик, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0002-4995-3059>, karina.lundaeva@spbpu.com
4. Сальбек Бекетов, Аналитик, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0009-6448-9486>, salbek.beketov@spbpu.com

About authors:

1. Zhanna Burlutskaya, posten, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-5680-1937>, zhanna.burlutskaya@spbpu.com
2. Polina Sharko, posten, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0006-4775-5189>, polina.sharko@spbpu.com
3. Karina Lundaeva, Analyst, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0002-4995-3059>, karina.lundaeva@spbpu.com
4. Salbek Beketov, Analyst, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0009-6448-9486>, salbek.beketov@spbpu.com

Научная статья

УДК 658.511.3

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.3>

АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ГРУЗОВ НА СКЛАДЕ В КОМПАНИЯХ 3PL-ЛОГИСТИКИ

Олег Карванен*, Алексей Гинцяк

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,
olegkarvanen@yandex.ru, gintsyak_am@spbstu.ru

*Автор, ответственный за переписку: olegkarvanen@yandex.ru

Аннотация

В работе исследуются показатели эффективности размещения грузов на складе в компаниях 3PL-логистики. Представлена система показателей эффективности размещения грузов на складе, разделенных на группы: показатель эффективности заполнения ячеек склада, показатель заполненности склада и показатель актуальности конфигурации склада. Показатель актуальности конфигурации склада имеет особую ценность для компаний 3PL-логистики, поскольку позволяет оценивать соответствие текущих размеров ячеек с учетом изменяющегося состава грузов и принимать стратегические решения о необходимости изменения конфигурации склада. Представлена логическая схема принятия решений о проведении мероприятий по оптимизации размещения грузов на складе в зависимости от величины показателей. Результаты работы могут быть использованы для построения комплексной системы управления эффективностью размещения грузов на складе в компаниях 3PL-логистики.

Ключевые слова: 3PL-логистика, конфигурация склада, эффективность размещения.

Цитирование: Карванен, О., Гинцяк, А., 2025. Алгоритм принятия решения об оптимизации размещения грузов на складе в компаниях 3PL-логистики. Sustainable Development and Engineering Economics 4, 3. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.3>

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

© Карванен О., Гинцяк А., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.3>

DECISION-MAKING ALGORITHM FOR OPTIMIZING CARGO STORAGE IN 3PL LOGISTICS COMPANIES

Oleg Karvanen*^{}, Aleksei Gintciak^{}

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, olegkarvanen@yandex.ru, gintsyak_am@spbstu.ru

*Corresponding author: olegkarvanen@yandex.ru

Abstract

The paper examines the efficiency indicators of cargo storage in 3PL logistics companies. A system of indicators of the efficiency of cargo placement in a warehouse is presented, divided into groups: an indicator of the efficiency of filling warehouse cells, an indicator of warehouse occupancy and an indicator of the relevance of the warehouse configuration. The indicator of the relevance of the warehouse configuration is of particular value for 3PL logistics companies, as it allows them to assess the compliance of current cell sizes taking into account the changing cargo composition and make strategic decisions about the need to change the warehouse configuration. A logical scheme of making decisions on measures to optimize the placement of goods in a warehouse, depending on the magnitude of the indicators, is presented. The results of the work can be used to build a comprehensive management system for the efficiency of cargo storage in 3PL logistics companies.

Keywords: 3PL, warehouse configuration, location efficiency.

Citation: Karvanen, O., Gintciak, A., 2025. Decision-making algorithm for optimizing cargo storage in 3PL companies. *Sustainable Development and Engineering Economics* 4, 3. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.3>

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

© Karvanen O., Gintciak, A., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

Управление эффективностью размещения грузов на складе является условием конкурентоспособности оператора третьей стороны (3PL-оператора), поскольку позволяет корректно оценивать потенциал хранения грузов на складе, возможность принять грузы в определенных объемах, планировать операции по увеличению эффективности размещения грузов. Хранение является одной из наиболее весомых операций 3PL-оператора.

Компании 3PL-логистики сталкиваются со специфическими сложностями при управлении эффективностью размещения грузов на складе, вызванными непостоянством состава клиентов, различием грузов по весогабаритным характеристикам, условиям хранения. К таким сложностям относятся нестабильность структуры грузов и объемов их хранения.

Для управления эффективностью размещения грузов на складе 3PL-оператор использует показатели оценки эффективности размещения. Показатели эффективности размещения взаимосвязаны, и принимаемые решения по оптимизации размещения зависят от значений сразу нескольких показателей. Значение одного показателя может быть критическим само по себе, но конечное решение по оптимизации размещения будет зависеть от значений и других показателей.

Показатели эффективности размещения должны рассматриваться в системе. Система показателей эффективности размещения грузов на складе позволяет принимать грамотные решения по оптимизации размещения, учитывая значения всех показателей.

Поскольку решения по оптимизации размещения грузов несут весомые издержки и могут требовать привлечения в работу персонала высокого уровня компетенций, 3PL-оператору важно правильно оценивать целесообразность проведения того или иного мероприятия. Именно рассмотрение показателей эффективности размещения грузов в системе позволяет объективнее оценивать текущую ситуацию и выбирать грамотные решения.

Цель работы – представить схему показателей эффективности размещения грузов на складе и алгоритм принятия решений об оптимизации размещения грузов, учитывающий особенности 3PL-логистики (непостоянство структуры грузов, объемов хранения). Новизна работы обоснована введением показателя актуальности конфигурации склада и рассмотрением показателей эффективности размещения грузов в системе, позволяющей оценивать целесообразность тех или иных мероприятий по оптимизации размещения грузов на складе.

2. Материалы и методы

В ходе исследования был рассмотрен опыт в оптимизации размещения грузов на складе 3PL-оператора ООО «Ди-Эл-Джи Карго» с подкреплением типового характера этих проблем анализом общедоступных источников, в том числе научной литературы. Особенное внимание было уделено вопросу актуальности конфигурации склада, наиболее специфичному для компаний 3PL-логистики.

ООО «Ди-Эл-Джи Карго» является компанией регионального масштаба, имеет четыре помещения, совокупно около 30000 м² складских площадей. На складах компании хранятся разные грузы: бытовая техника, одежда, пищевая и химическая продукция, телекоммуникационное оборудование. Клиенты компании – представители малого, среднего и крупного бизнеса.

3. Обзор литературы

В научных работах в вопросах эффективности размещения грузов заслуженное внимание уделяется функционалу систем управления складом (WMS-систем). WMS-системы позволяют добиваться высокой эффективности выполнения различных складских операций, в том числе хранения, поскольку способны подбирать оптимальные ячейки для грузов при заданных правилах хранения (Al Bashar, 2024; Andrejić & Pajić, 2024; Alamsah et al., 2024; Ailyn & Lapine, 2024).

Авторы отмечают преимущества использования методики ABC-анализа при планировании размещения грузов (Yan, 2024; Lehmusto, 2024; Seanbudda et al., 2025), а также предлагают альтернативные алгоритмы, включая генетические (Qin et al., 2013; Kmieciak, 2025). В (Qin et al., 2013) предложен способ определения зонирования склада за счет генетических алгоритмов. Стоит отметить, что применение данных алгоритмов и методик зачастую рассматривается в контексте их внедрения в функционал WMS-систем. Более того, ощутима тенденция применения машинного обучения при разработке WMS-систем: продвинутая аналитическая составляющая может послужить двигателем технологического прогресса WMS-систем (De Assis, 2024; Hajdu, 2024; Jararweh et al., 2025; Kocaoglu, 2024). В (Li et al., 2024) описывается методика построения интеллектуального складирования с применением глубокого машинного обучения.

Помимо WMS-систем, в научных работах уделяется внимание грамотной планировке склада для оптимизации размещения грузов и, как следствие, увеличения производительности других операций (Mohamud et al., 2023; Nord Nilsson & Eriksson, 2023). Авторы предлагают использование давно и успешно применяемых инструментов бережливого производства, таких как, например, 5S, карта потока создания ценности, «5 почему» (Hanggara, 2024; Osman et al., 2025; Ilmi et al., 2024; Harendsa & Pulansari, 2025; Fares et al., 2025; Benmimoun et al., 2024).

В (Shadchenko et al., 2020; Sirotkin, 2020) упомянуты конкретные операции по оптимизации размещения имеющихся грузов на складе: «компрессия» остатков товаров в ячейках штучного отбора и перемещение их в ячейки, более подходящие по размеру.

Стоит отметить, что в вопросах эффективности размещения грузов на складе в научных работах уделяется внимание инструментам и методам преимущественно на этапах планирования размещения грузов. При этом редко рассматриваются работы по оптимизации размещения уже имеющихся грузов, а также по изменению конфигурации склада (включая изменение размеров ячеек). При этом проблема непостоянства структуры грузов и объемов их хранения присуща компаниям 3PL-логистики и требует систематического мониторинга показателей для принятия взвешенных решений по проведению определенных операций по оптимизации размещения – уплотнению ячеек, изменению конфигурации склада. Налаженная система управления эффективностью размещения грузов на складе позволяет 3PL-оператору своевременно реагировать на изменения структуры грузов и объемов их хранения, обеспечивая достаточное количество мест хранения для грузов действующих и новых клиентов, а также повышать производительность складских операций.

4. Результаты

Для оценки эффективности размещения грузов на складе используется система показателей, разделенных на три основные группы:

Показатель эффективности заполнения ячеек склада

Базовым показателем для оценки общей эффективности заполнения ячеек склада используется показатель эффективности заполнения ячеек склада:

$$\text{Эффективность заполнения ячеек склада, \%} = \frac{(\sum \text{Объем груза})}{(\sum \text{Объем занятой ячейки})} * 100\%. \quad (1)$$

Поскольку при размещении груза в ячейку необходим зазор (для подъема груза на вилах погрузочно-разгрузочной техникой), при расчете высоты груза учитывается высота зазора и поддона.

Показатель заполненности склада по ячейкам

Показатель заполненности склада по ячейкам позволяет понять, насколько критичен уровень заполненности склада сейчас: когда заполнены практически все ячейки склада, WMS-система подбирает для новых грузов оптимальную ячейку из имеющихся, размеры которых могут быть существенно больше, чем сами грузы. В таком случае показатель эффективности заполнения ячеек склада неизбежно снижается.

$$\text{Заполненность склада по ячейкам, \%} = \frac{(\text{Количество занятых ячеек склада})}{(\text{Количество всех ячеек склада})} * 100\%. \quad (2)$$

Представленные выше формулы (1) и (2) являются типовыми и активно используются в современных WMS-системах. Следующая же формула для вычисления показателя актуальности конфигурации склада является авторской разработкой.

Показатель актуальности конфигурации склада

Поскольку на складе 3PL-оператора часто меняется структура грузов, конфигурация может быстро терять актуальность. WMS-система подбирает для грузов оптимальные по размерам ячейки, однако, несмотря на то что выбранная ячейка лучше остальных может подходить для груза, ее размеры могут быть все равно слишком большими для этого груза, что неизбежно снижает показатель эффективности размещения на складе. Показатель актуальности конфигурации склада позволяет оценить, насколько ячейки имеющихся размеров позволяют эффективно размещать грузы, насколько возможно повысить эффективность размещения грузов без изменения конфигурации склада.

Основным инструментом оптимизации размещения грузов без изменения конфигурации склада является уплотнение ячеек, которое происходит за счет перемещения грузов из нескольких ячеек в одну ячейку или перемещения грузов в ячейки более подходящих размеров.

Изменение конфигурации склада включает более трудоемкие процессы, связанные с предварительным анализом подходящих высот ячеек, перевесом балок, изменением в WMS-системе характеристик ячеек (размера, принадлежности к зоне). При изменении конфигурации склада в работу привлекается больше квалифицированных специалистов, расходуется больше трудовых ресурсов.

Показатель актуальности конфигурации склада равен отношению грузов, для которых есть ячейка подходящих весогабаритных характеристик, к общему количеству грузов. Под грузом в данном контексте мы понимаем паллет с товаром, который размещается в ячейку. Ячейка имеет подходящие весогабаритные характеристики для размещения груза при соответствии по ширине и длине, допустимой разнице в высоте (рекомендуется, чтобы высота ячейки не была выше 10 см высоты груза), а также при достаточной грузоподъемности.

Исходя из достаточности количества ячеек для хранения грузов соответствующих размеров формируется показатель актуальности конфигурации склада:

$$\text{Актуальность конфигурации склада, \%} = \frac{\text{(Количество грузов с подходящей ячейкой)}}{\text{(Количество всех грузов)}} * 100\%. \quad (3)$$

При анализе эффективности размещения грузов на складе 3PL-оператору необходимо определить целевые и критические значения показателей эффективности размещения. Решение о проведении конкретных работ по оптимизации размещения грузов должно приниматься на основании значений всех этих показателей.

На рис. 1 представлена схема принятия решений по организации работ по оптимизации размещения с учетом показателей эффективности размещения грузов.

Для показателя эффективности заполнения ячеек склада (1) на основании эмпирического опыта рекомендуется определять целевое значение от 95% и выше. Данное значение взято из практического опыта ООО «Ди-Эл-Джи Карго». При значении показателя (1) ниже целевого 3PL-оператору необходимо проводить работы по оптимизации размещения грузов. Безусловно, значение показателя эффективности заполнения ячеек склада (1) может быть более или менее критическим в зависимости от близости к целевому. От этого будет зависеть приоритетность организации мероприятий по оптимизации размещения грузов.

Допустима следующая градация показателя эффективности заполнения ячеек склада:

ниже 75% – неудовлетворительно;

75–84% – удовлетворительно;

85–94% – хорошо;

95% и выше – отлично.

При критически высоком значении показателя заполненности склада по ячейкам (2) (на практике – от 95% и выше) неизбежно снижается показатель эффективности заполнения ячеек склада (1), поскольку WMS-система подбирает для размещения груза оптимальную ячейку из оставшихся, маловероятно подходящих по характеристикам. Наиболее вероятны и необходимы мероприятия по оптимизации размещения грузов на складе именно после таких критических периодов заполненности склада.

Допустима следующая градация показателя заполненности склада по ячейкам (2) при оценке целесообразности проведения мероприятий по оптимизации размещения:

ниже 60% (включая ожидаемое увеличение объемов) – низкая, проведение мероприятий по уплотнению ячеек нецелесообразно;

60% и выше (включая ожидаемое увеличение объемов) – высокая, проведение мероприятий по уплотнению ячеек целесообразно.

Допустима следующая градация показателя актуальности конфигурации склада (3) при оценке необходимости изменения размеров ячеек:

ниже 80% – необходимо изменение конфигурации склада перед проведением уплотнений ячеек.

выше 80% – уплотнение ячеек допустимо без изменения конфигурации склада.

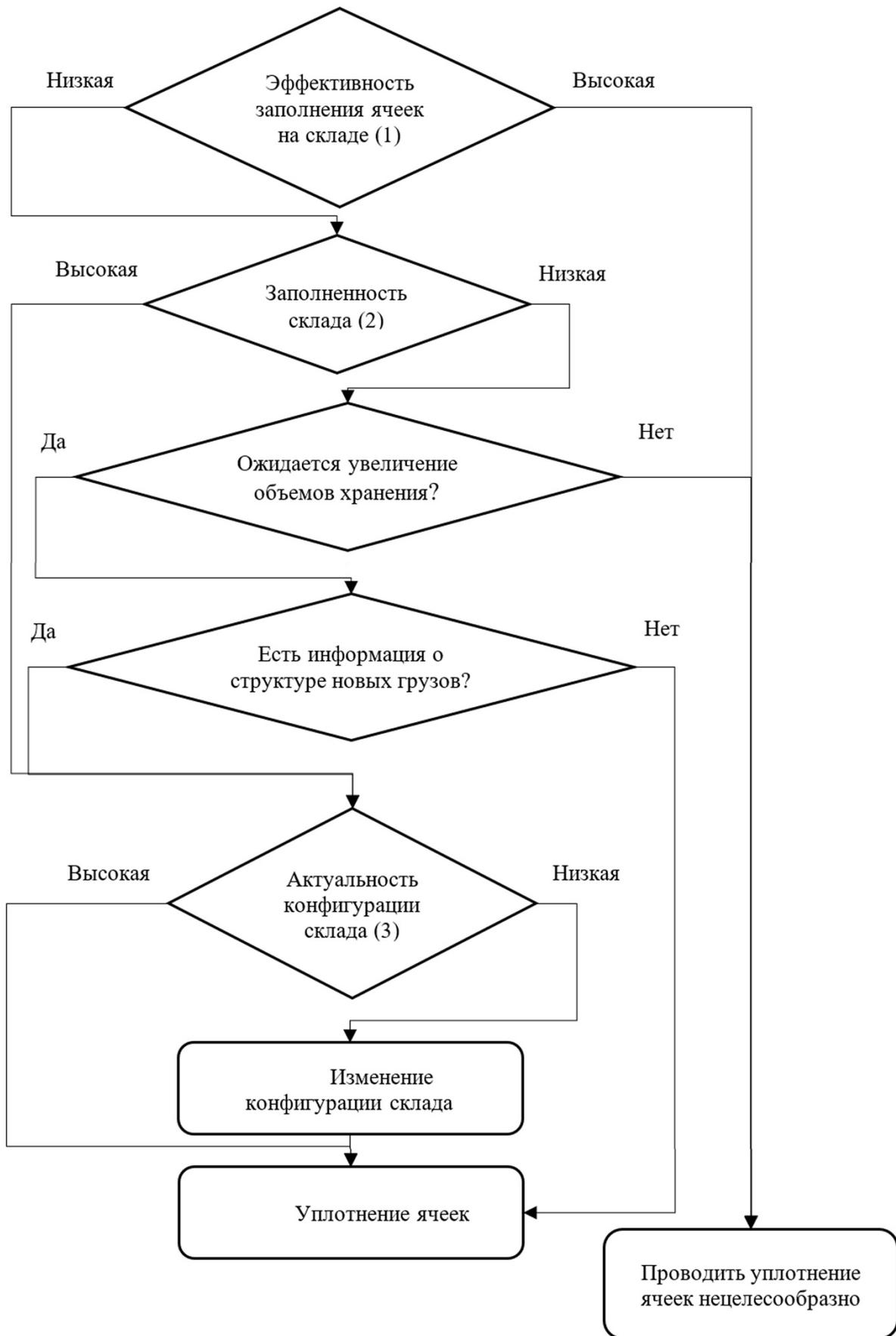


Рисунок 1. Логическая схема принятия решений в зависимости от значений показателей эффективности размещения

Все пороговые значения определены на основании эмпирического опыта, связанного с управлением складом 3PL-логистики.

Отдельно стоит отметить необходимость настройки получения обратной связи об ожидаемой динамике объемов хранения груза и структуре новых грузов от соответствующих функций компании. Автоматизация данных операций возможна путем их перевода в смарт-процессы в CRM-системах.

При настройке в WMS-системе автоматического расчета представленных показателей эффективности размещения грузов обеспечивается наглядность результатов применения алгоритма.

Процесс изменения конфигурации склада представляет весьма трудоемкий процесс аналитических вычислений и планирования ресурсов. Уплотнение ячеек представляет собой куда более автоматизированный процесс, регулируемый WMS-системой, при условии предварительной проверки корректности регистрации грузов в WMS-системе.

Представленный алгоритм рекомендуется использовать руководству склада на еженедельной основе. Данная периодичность обусловлена возможностью выбирать для работ по оптимизации размещения грузов на складе периоды низкой интенсивности: зачастую это выходные дни, когда объемы работ по приемке грузов, комплектации и отгрузке заказов минимальны. Такие условия позволяют обеспечить достаточное количество персонала, техники и свободный доступ к ячейкам хранения для их уплотнения и изменения конфигурации. Работы по оптимизации размещения попутно позволяют минимизировать простои ресурсов (в первую очередь – человеческих), вызванные низкой интенсивностью работ в определенные периоды.

Алгоритм находится на стадии внедрения в систему управления эффективностью размещения грузов на складе в ООО «Ди-Эл-Джи Карго». Для более продуктивного использования алгоритма внедрена система предварительных аудитов размещения грузов в WMS-системе: на основании перечня критериев правильного размещения еженедельно проверяется корректность размещения грузов, выявляются и устраняются ошибки, тормозящие производительность складских процессов (например, некорректно заведенные весогабаритные характеристики товара, размещение грузов в запрещенные ячейки вследствие перемещений в обход задания WMS-системы), и таким образом подготавливаются корректные данные для расчета и анализа показателей (1), (2), (3).

Также для ускорения расчета показателей разработан универсальный отчет в WMS-системе, позволяющий оперативно выгружать требуемые данные. Расчет показателя актуальности конфигурации склада производится с помощью инструментария Python.

В ближайших планах проработки алгоритма стоит описание системы управления эффективностью размещения грузов на складе с учетом использования алгоритма и запуск еженедельных работ по оптимизации размещения грузов на складах компании. Управление показателем эффективности заполнения ячеек склада (1) лежит в ответственности руководства складов и является составляющей их мотивации (KPI).

5. Обсуждение

Формирование показателей эффективности размещения грузов на складе служит отправной точкой для проведения сложной аналитики и создания системы управления

эффективностью размещения грузов на складе. Для получения и обработки большого объема данных в контексте управления эффективностью размещения грузов на складе 3PL-оператору необходимо применять цифровые инструменты (Gintciak et al., 2023, Lundaeva et al., 2025), к которым относятся системы WMS и ERP, а также вспомогательные BI-инструменты в случае, если функционала WMS и ERP недостаточно (Karvanen & Gintciak, 2025).

Показатель актуальности конфигурации склада (3) наиболее специфичен для компаний 3PL-логистики, позволяет принимать стратегические решения в оптимизации размещения грузов на складе, оценивая текущие условия хранения с учетом показателей эффективности заполнения ячеек склада (1) и заполненности склада по ячейкам (2).

Конечное решение по оптимизации размещения зависит от значений показателей в совокупности.

Представленная логическая схема принятия решений может постоянно дорабатываться с учетом изменяющихся приоритетов 3PL-оператора, имеющихся производственных мощностей, технологического уровня развития клиентов. Также могут возрасти количество и конкретика принимаемых решений по оптимизации размещения, например проведения уплотнений определенных зон, ячеек определенных высот. Детальный расчет экономической эффективности процессов уплотнения ячеек и изменения конфигурации склада позволит точнее оценивать целесообразность проводимых работ по оптимизации размещения грузов на складе.

Формализация и автоматизация процессов изменения конфигурации склада, получения обратной связи о динамике объемов хранения и структуры грузов являются перспективным направлением будущих исследований.

6. Заключение

В качестве результата исследования представлены система показателей эффективности размещения грузов на складе для компаний 3PL-логистики и схема принятия решений в зависимости от значения этих показателей. В ходе исследования был рассмотрен опыт в оптимизации размещения грузов на складе 3PL-оператора ООО «Ди-Эл-Джи Карго».

Показатели эффективности размещения грузов на складе следует рассматривать в системе ввиду их тесной взаимосвязи.

Результаты работы могут быть использованы для построения комплексной системы управления эффективностью размещения грузов на складе в компаниях 3PL-логистики

Список литературы

- Ailyn, D., Lapine, C., 2024. Advanced warehouse management systems and inventory optimization for SMEs.
- Al Bashar, M.A., 2024. Roadmap to Modern Warehouse Management System. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science* Volume 6 (5) 11. <https://doi.org/10.56726/IRJMETTS57356>
- Alamsah, U., Muftiadi, A., Arifianti, R., 2024. Comparative analysis of outsourcing and in house warehouse management system to improve productivity and stock accuracy. *JPII (Jurnal Penelitian Pendidikan Indonesia)* 10 (4) 908–919. <https://doi.org/10.29210/020244964>
- Andrejić, M., Pajić, V., 2024. Managing Warehouse Risks for 3PL Providers: A Novel Approach Based on FMECA-DEA. *Journal of Organizations, Technology and Entrepreneurship* 2 (2) 113–121. <https://doi.org/10.56578/jote020204>
- Benmimoun, R., El Kihel, A., Embarki, S., El Bachir, K., 2024. Combining Lean Tools and 4.0 Technologies: Application in a Logistic Warehouse, in: *International Conference on Digital Technologies and Applications*. Springer, Cham, pp. 485–495. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68653-5_46
- De Assis, R.F., Faria, A.F., Thomasset-Laperrière, V., Santa-Eulalia, L.A., Ouhimmou, M., de Paula Ferreira, W., 2024. Machine Learning in Warehouse Management: A Survey. *Procedia Computer Science* 232, 2790–2799. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.096>

- Fares, N., Lloret, J., Kumar, V., Frederico, G.F., Kamach, O., Garza-Reyes, J.A., 2025. Lean implementation case study for manual order picking and packing in warehousing operations. *International Journal of Lean Six Sigma ahead-of-print (ahead-of-print)*. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-05-2024-0097>
- Hajdu, N., 2024. *Advancing Organizational Analytics: A Strategic Roadmap for Implementing Machine Learning in Warehouse Management System*, Master's Thesis. University of Oulu.
- Hanggara, F.D., 2024. Warehouse analysis using 5s and abc classification method on CV. Karya Jaya. *Jurnal Sains, Teknologi Dan Industri* 21 (2), 245–253. <https://doi.org/10.24014/sitekin.v21i2.28982>
- Harenda, N.P., Pulansari, F., 2025. Analysis of Finished Product Warehouse Activity Flow Using Lean Warehouse Method. *ITEJ (Information Technology Engineering Journals)* 10 (1), 29–38. <https://doi.org/10.24235/itej.v10i1.202>
- Ilmi, M.N., W, E.P., Winursito, Y.C., 2024. Implementation of Lean Warehouse to Improve The Performance of Warehouse Activities at PT. ABC. *The Indonesian Journal of Computer Science* 13 (1). <https://doi.org/10.33022/ijcs.v13i1.3785>
- Jararweh, A., Yatim, A.R., Al-Bataineh, H., Al-Younes, M., 2025. Development and Implementation of Dimensional Weight Algorithms for Improved Efficiency in Warehouse Management Systems. *International Journal of Recent Technology and Applied Science (IJORTAS)* 7 (1), 17–25. <https://doi.org/10.36079/lamintang.ijortas-0701.751>
- Kmiecik, M., 2025. Creating a genetic algorithm for third-party logistics' warehouse delivery scheduling via a large language model. *Journal of Modelling in Management* 20 (4), 1138–1162. <https://doi.org/10.1108/JM2-06-2024-0192>
- Kocaoglu, B. *Enterprise Applications in Logistics (Data Processing)*, in: *Logistics Information Systems: Digital Transformation and Supply Chain Applications in the 4.0 Era*. Springer, Cham, pp. 121–180.
- Lehmusto, R., 2024. *Optimizing Warehouse Operations: ABC Analysis and Strategic Enhancements for Case Company*, Bachelor's Thesis. Metropolia University of Applied Sciences.
- Li, A., Zhuang, S., Yang, T., Lu, W., Xu, J., 2024. Optimization of logistics cargo tracking and transportation efficiency based on data science deep learning models. *Applied and Computational Engineering* 69, 71–77.
- Mohamad, I.H., Kafi, Md.A., Shahron, S.A., Zainuddin, N., Musaet, S., 2023. The Role of Warehouse Layout and Operations in Warehouse Efficiency: A Literature Review. *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 56 (1), 61–68. <https://doi.org/10.18280/jesa.560109>
- Nord Nilsson V., Eriksson K. *Improving Warehouse Efficiency: An Exploratory Analysis of Pallet Handling in a Production Warehouse: A Case Study at a Small and Medium-sized Enterprise within the Surface Treatment Industry.* – 2023.
- Osman, M.K., Mohamad, E., Kamarudin, N., Rahman, A.A., 2024. Warehouse operations optimisation through the implementation of lean methodology: A comprehensive review. *Multidisciplinary Reviews* 8 (4) e2025110. <https://doi.org/10.31893/multirev.2025110>
- Qin, G., Li, J., Jiang, N., Li, Q., 2013. Warehouse Optimization Model Based on Genetic Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering* 2013 (1), 619029. <https://doi.org/10.1155/2013/619029>
- Seanbudda, P., Noomthursat, A., Utakavapee, S., Keawsrichun, T., Anthachai, N., 2025. Increasing Efficiency in Warehouse Management by Using ABC Analysis of Outlet Mall Company Limited, Udonthani Branch. *National & International Conference* 18 (1), 93–99.
- Yan, X., 2024. The Consulting Research of ABC Warehouse. *Advances in Economics, Management and Political Sciences* 72, 137–147. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/72/20240663>
- Yue, T., Sherwood, D. *Managing Lean Success: A Warehouse Balancing Act (A)*. School of Management, Erasmus University, Rotterdam, 2024.
- Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Федяевская Д.Э., Пospelov К.Н., Ракова В.В. *Цифровое моделирование социотехнических и социально-экономических систем: монография*. СПб.: Политех-Пресс, 2023. 164 с.
- Карванен О.А., Гинцяк А.М. Проблемы в сфере 3PL-логистики в условиях цифровизации // *Автоматизация в промышленности*. 2025. № 3. С. 59–63.
- Лундаева К.А., Гинцяк А.М., Пospelov К.Н., Бурлуцкая Ж.В., Редько С.Г. Комплексный подход к валидации цифровых моделей: исследование подходов и метрик // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2025. № 2. С. 100–112. <https://doi.org/10.14357/20718632250209>
- Сироткин А.А. *Цифровизация складской логистики // Актуальные проблемы современного транспорта*. 2020. Т. 3. № 3. С. 52–58.
- Шадченко Н. Ю. К вопросу об оптимизации работы склада розничной торговой сети // *Базис*. 2020. Т. 2. № 8. С. 5–8.

References

- Ailyn, D., Lapine, C., 2024. Advanced warehouse management systems and inventory optimization for SMEs.
- Al Bashar, M.A., 2024. Roadmap to Modern Warehouse Management System. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science* Volume 6 (5), 11. <https://doi.org/10.56726/IRJMETSS7356>
- Alamsah, U., Muftiadi, A., Arifianti, R., 2024. Comparative analysis of outsourcing and in house warehouse management system to improve productivity and stock accuracy. *JPPi (Jurnal Penelitian Pendidikan Indonesia)* 10 (4) 908–919. <https://doi.org/10.29210/020244964>
- Andrejić, M., Pajić, V., 2024. Managing Warehouse Risks for 3PL Providers: A Novel Approach Based on FMECA-DEA. *Journal of Organizations, Technology and Entrepreneurship* 2 (2), 113–121. <https://doi.org/10.56578/jote020204>
- Benmimoun, R., El Kihel, A., Embarki, S., El Bachir, K., 2024. Combining Lean Tools and 4.0 Technologies: Application in a Logistic Warehouse, in: *International Conference on Digital Technologies and Applications*. Springer, Cham, pp. 485–495. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68653-5_46
- De Assis, R.F., Faria, A.F., Thomasset-Laperrière, V., Santa-Eulalia, L.A., Ouhimmou, M., de Paula Ferreira, W., 2024. Machine Learning in Warehouse Management: A Survey. *Procedia Computer Science* 232, 2790–2799. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.096>
- Fares, N., Lloret, J., Kumar, V., Frederico, G.F., Kamach, O., Garza-Reyes, J.A., 2025. Lean implementation case study for manual order picking and packing in warehousing operations. *International Journal of Lean Six Sigma ahead-of-print (ahead-of-print)*. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-05-2024-0097>
- Gintciak, A.M., Burlutskaya, Zh.V., Fedyaevskaya, D.E., Pospelov, K.N., Rakova, V.V., 2023. *Digital Modeling of Sociotechnical and Socio-Economic Systems*. Politekh-Press, St. Petersburg.
- Hajdu, N., 2024. *Advancing Organizational Analytics: A Strategic Roadmap for Implementing Machine Learning in Warehouse Management System*, Master's Thesis. University of Oulu.
- Hanggara, F.D., 2024. Warehouse analysis using 5s and abc classification method on CV. Karya Jaya. *Jurnal Sains, Teknologi Dan Industri* 21 (2), 245–253. <https://doi.org/10.24014/sitekin.v21i2.28982>

- Harends, N.P., Pulansari, F., 2025. Analysis of Finished Product Warehouse Activity Flow Using Lean Warehouse Method. *ITEJ (Information Technology Engineering Journals)* 10 (1), 29–38. <https://doi.org/10.24235/itej.v10i1.202>
- Ilmi, M.N., W, E.P., Winursito, Y.C., 2024. Implementation of Lean Warehouse to Improve The Performance of Warehouse Activities at PT. ABC. *The Indonesian Journal of Computer Science* 13 (1). <https://doi.org/10.33022/ijcs.v13i1.3785>
- Jararweh, A., Yatim, A.R., Al-Bataineh, H., Al-Younes, M., 2025. Development and Implementation of Dimensional Weight Algorithms for Improved Efficiency in Warehouse Management Systems. *International Journal of Recent Technology and Applied Science (IJORTAS)* 7 (1), 17–25. <https://doi.org/10.36079/lamintang.ijortas-0701.751>
- Lundaeva, K.A., Gintciak, A.M., Pospelov, K.N., Burlutskaya, Zh.V., Redko, S.G., 2025. An integrated approach to the validation of digital models: a study of approaches and metrics. *Information Technologies and computing Systems* 2, 100–112. <https://doi.org/10.14357/20718632250209>
- Karvanen, O.A., Gintciak, A.M., 2025. Problemy v sfere 3PL-logistiki v usloviyakh tsifrovizatsii [Problems in the field of 3PL logistics in the context of digitalization]. *Automation in Industry* 3, 59–63.
- Kmieciak, M., 2025. Creating a genetic algorithm for third-party logistics' warehouse delivery scheduling via a large language model. *Journal of Modelling in Management* 20 (4), 1138–1162. <https://doi.org/10.1108/JM2-06-2024-0192>
- Kocaoglu, B. *Enterprise Applications in Logistics (Data Processing)*, in: *Logistics Information Systems: Digital Transformation and Supply Chain Applications in the 4.0 Era*. Springer, Cham, pp. 121–180.
- Lehmusto, R., 2024. *Optimizing Warehouse Operations: ABC Analysis and Strategic Enhancements for Case Company*, Bachelor's Thesis. Metropolia University of Applied Sciences.
- Li, A., Zhuang, S., Yang, T., Lu, W., Xu, J., 2024. Optimization of logistics cargo tracking and transportation efficiency based on data science deep learning models. *Applied and Computational Engineering* 69, 71–77.
- Mohamad, I.H., Kafi, Md.A., Shahron, S.A., Zainuddin, N., Musaed, S., 2023. The Role of Warehouse Layout and Operations in Warehouse Efficiency: A Literature Review. *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 56 (1), 61–68. <https://doi.org/10.18280/jesa.560109>
- Nord Nilsson, V., Eriksson, K., 2023. *Improving Warehouse Efficiency: An Exploratory Analysis of Pallet Handling in a Production Warehouse: A Case Study at a Small and Medium-sized Enterprise within the Surface Treatment Industry*. Jönköping University.
- Osman, M.K., Mohamad, E., Kamarudin, N., Rahman, A.A., 2024. Warehouse operations optimisation through the implementation of lean methodology: A comprehensive review. *Multidisciplinary Reviews* 8 (4) e2025110. <https://doi.org/10.31893/multirev.2025110>
- Qin, G., Li, J., Jiang, N., Li, Q., 2013. Warehouse Optimization Model Based on Genetic Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering* 2013 (1), 619029. <https://doi.org/10.1155/2013/619029>
- Seanbudda, P., Noomthursat, A., Utakavapee, S., Keawsrichun, T., Anthachai, N., 2025. Increasing Efficiency in Warehouse Management by Using ABC Analysis of Outlet Mall Company Limited, Udon Thani Branch. *National & International Conference* 18 (1), 93–99.
- Shadchenko, N., 2020. To the question of retail trade network warehouse operation optimization. *Basis* 2 (8), 5–8.
- Sirotkin, A.A., 2020. Digitalization of warehouse logistics. *Actual problems of modern transport* 3 (3), 52–58.
- Yan, X., 2024. The Consulting Research of ABC Warehouse. *Advances in Economics, Management and Political Sciences* 72, 137–147. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/72/20240663>
- Yue, T., Sherwood, D. *Managing Lean Success: A Warehouse Balancing Act (A)*. School of Management, Erasmus University, Rotterdam, 2024.

Статья поступила в редакцию 23.11.2025, одобрена после рецензирования 07.12.2025, принята к публикации 14.12.2025.

The article was submitted 23.11.2025, approved after reviewing 07.12.2025, accepted for publication 14.12.2025.

Информация об авторах:

1. Олег Карванен, магистр, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация. <https://orcid.org/0009-0003-4611-1574>, olegkarvanen@yandex.ru
2. 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

About the authors:

1. Oleg Karvanen, Master, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0003-4611-1574>, olegkarvanen@yandex.ru
2. Aleksei Gintciak, Head of the laboratory, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, <https://orcid.org/0000-0002-9703-5079>, gintsyak_am@spbstu.ru

Научная статья

УДК 37.013.5

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.4>

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИНТЕГРАЦИИ ИННОВАЦИЙ В УЧЕБНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Диана Козикова* 

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,
kozikovadi@gmail.com

*Автор, ответственный за переписку: kozikovadi@gmail.com

Аннотация

В статье представлен теоретико-методологический подход к исследованию процессов интеграции инноваций в учебную деятельность образовательных организаций, основанный на использовании инструментов имитационного моделирования. Образовательная организация рассматривается как сложная динамическая система в рамках системного подхода, что позволяет более детально анализировать нелинейные процессы внедрения нововведений и их системные последствия. В условиях быстрого изменения образовательной среды и постоянного появления новых технологий, важность эффективной интеграции инноваций становится особенно актуальной. Центральным результатом работы является разработка теоретической модели, которая раскрывает системные взаимосвязи между элементами образовательной среды в условиях инновационных изменений. Данная модель позволяет исследовать, как различные факторы влияют на успешность внедрения новшеств, а также как они взаимодействуют друг с другом. В ходе исследования проведен сравнительный анализ возможностей дискретно-событийного моделирования, агентного моделирования и системной динамики для рассмотрения их применимости для решения задач управления инновациями на различных уровнях – от операционного до стратегического. Выявлены методологические ограничения и комплементарный потенциал каждого из подходов. Практическая значимость исследования заключается в формировании оснований для выбора адекватных инструментов моделирования при проектировании и оценке последствий внедрения инноваций в образовательных организациях.

Ключевые слова: имитационное моделирование, интеграция инноваций, образовательная организация, системный подход.

Цитирование: Козикова, Д., 2025. Имитационное моделирование процессов интеграции инноваций в учебную деятельность образовательных организаций. Sustainable Development and Engineering Economics 4, 4. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.4>

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

© Козикова Д., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.4>

SIMULATION MODELING OF THE PROCESSES OF INTEGRATING INNOVATIONS INTO THE EDUCATIONAL ACTIVITIES OF EDUCATIONAL ORGANIZATIONS

Diana Kozikova*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, kozikovadi@gmail.com

*Corresponding author: kozikovadi@gmail.com

Abstract

This article presents a theoretical and methodological approach to investigating the processes of innovation integration into the educational activities of educational organizations, leveraging simulation modeling tools. Within the framework of a systems approach, an educational organization is conceptualized as a complex dynamic system. This allows for a more detailed analysis of the nonlinear processes involved in innovation implementation and their systemic consequences. Amidst rapid changes in the educational environment and the continuous emergence of new technologies, the importance of effective innovation integration becomes particularly crucial. The central outcome of this work is the development of a theoretical model that elucidates the systemic interconnections among elements of the educational environment under conditions of innovative change. This model facilitates the investigation of how various factors influence the success of innovation implementation and how they mutually interact. The study conducted a comparative analysis of the capabilities of discrete-event simulation, agent-based modeling, and system dynamics. This analysis aimed to assess their applicability for addressing innovation management tasks at various levels, ranging from operational to strategic. Methodological limitations and the complementary potential of each approach were identified. The practical significance of this research lies in establishing a framework for selecting appropriate modeling tools to design and evaluate the implications of innovation implementation within educational organizations.

Keywords: simulation modeling, innovation integration, educational organization, systematic approach.

Citation: Kozikova D., 2025. Simulation modeling of the processes of integrating innovations into the educational activities of educational organizations. *Sustainable Development and Engineering Economics* 4, 4. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.4>

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

© Kozikova D., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

Образовательные организации в современном мире представляют собой сложные динамические системы, функционирующие в условиях постоянных социально-экономических трансформаций. Объектом данного исследования выступают процессы интеграции инноваций в учебную деятельность образовательных организаций, рассматриваемые через призму методологии имитационного моделирования. Актуальность исследования обусловлена нарастающей потребностью в эффективных механизмах внедрения инновационных подходов в образовательную практику при сохранении системной целостности и достижении качественных образовательных результатов.

В контексте цифровой трансформации образования возникает научная проблема, связанная с отсутствием комплексного методологического подхода к управлению процессами интеграции инноваций. А.В. Панибратцев подчеркивает необходимость диалектического единства традиций и инноваций в образовании, где отсутствие обновления ведет к догматизму, а игнорирование культурного наследия лишает инновации гуманистического содержания (Панибратцев, 2025). Эта проблема усугубляется сложностью прогнозирования последствий внедрения инноваций и недостаточной изученностью динамических взаимосвязей между элементами образовательной системы.

Корреляция обозначенной проблемы с задачами настоящего исследования проявляется в необходимости разработки теоретических основ применения имитационного моделирования для анализа и оптимизации процессов интеграции инноваций. Исследование направлено на выявление потенциала различных видов имитационного моделирования для решения задач управления инновационными процессами в образовательных организациях, а также на определение методологических ограничений и перспектив использования данного подхода.

2. Обзор литературы

Анализ мировой научной литературы демонстрирует возрастающий интерес к проблематике имитационного моделирования в образовании, однако выявляет недостаточную разработанность теоретических основ его применения для управления процессами интеграции инноваций. Управление инновациями в образовательных организациях обладает существенной спецификой: оно сталкивается с высокой степенью неопределенности результатов, первостепенной важностью психолого-педагогических и социальных факторов адаптации коллектива, а также необходимостью балансировать между стандартизацией и творческой свободой (Гордиенко, 2023; Зятева и Питухин, 2021). Эти особенности формируют особые требования к инструментам анализа, делая актуальным поиск методов, способных работать с качественными параметрами и нелинейными сценариями развития.

В работах отечественных исследователей прослеживается несколько ключевых направлений изучения имитационного моделирования (Антошков, 2025). А.А. Макарова рассматривает имитационное моделирование как «наиболее востребованный метод моделирования, который позволяет строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности» (Макарова, 2021). Автор акцентирует внимание на практической ценности этого метода для решения учебно-практических задач в высшей школе, однако его исследование не затрагивает специфику моделирования процессов интеграции инноваций.

Значительный вклад в разработку теоретических основ имитационных технологий вносят Л.И. Кутепова и др., определяющие имитационные технологии как «вид педагогических

технологий, применение которых позволяет моделировать процесс профессиональной деятельности, тем самым формируя у студентов профессиональные компетенции» (Кутепова и др., 2020). Их работы раскрывают дидактический потенциал имитационных технологий, но ограничиваются преимущественно прикладными аспектами их применения.

В контексте интеграции традиционных и инновационных подходов представляет интерес исследование А.В. Панибратцева, который обосновывает необходимость «создания образовательного пространства, в котором традиционные ценности становятся предметом вдумчивого осмысления, критического анализа и творческой интерпретации» (Панибратцев, 2025). Его работа задает важные методологические ориентиры, но не предлагает конкретных инструментов управления процессами интеграции.

В научной литературе общепризнанно выделение трех ключевых парадигм имитационного моделирования: дискретно-событийного, агентного и системной динамики. А.В. Антошков анализирует потенциал и ограничения каждого из этих видов применительно к моделированию процессов в образовательных организациях (Антошков, 2025). Этот сравнительный анализ представляет значительную ценность для нашего исследования, задавая методологический ориентир для выбора инструментов моделирования.

В работе А.В. Хаперской и М.Г. Минина предложен оригинальный подход к «использованию агент-ориентированной модели для оценки поведения людей с ограниченными возможностями с целью прогнозирования их непредсказуемого поведения при обучении в онлайн-среде» (Хаперская и Минин, 2025). Это исследование демонстрирует потенциал имитационного моделирования для решения специфических задач образовательной инклюзии, что представляет особый интерес в контексте интеграции инноваций.

Зарубежные исследования вносят существенный вклад в понимание возможностей имитационного моделирования в образовании. Н. Кампос и др. приводят данные о «широком спектре возможностей использования имитационного моделирования в образовании: повышение мотивации слушателей, развитие критического мышления, повышенный интерес к обучению за счет индивидуального подхода к каждому слушателю» (Campos et al., 2020). К.Х. Бригас отмечает, что «имитационное моделирование в образовании хорошо подходит для оценки поведения динамических систем» (Brigas, 2019), что особенно значимо для моделирования инновационных процессов. Вместе с тем обзор показывает, что мировой опыт в части применения имитационного моделирования непосредственно для управления интеграционными процессами инноваций в образовательных организациях представлен фрагментарно.

Проведенный анализ литературы позволяет констатировать, что, несмотря на наличие значительного количества исследований, посвященных отдельным аспектам имитационного моделирования в образовании, отсутствуют работы, предлагающие комплексный теоретический подход к моделированию процессов интеграции инноваций. Настоящее исследование призвано восполнить этот пробел, синтезируя достижения различных научных школ и разрабатывая целостную теоретическую модель.

3. Материалы и методы

Методологическую основу исследования составляет комплексный теоретический анализ, включающий сравнительно-сопоставительный анализ научных концепций, концептуальное моделирование и систематизацию методологических подходов. Выбор данных методов обусловлен теоретическим характером исследования и необходимостью

выявления фундаментальных закономерностей применения имитационного моделирования для управления инновационными процессами в образовании.

Теоретико-методологический подход, лежащий в основе настоящего исследования, интегрирует три ключевых компонента. Во-первых, это системный подход, позволяющий рассматривать образовательную организацию как целостную сложную систему. Во-вторых, сравнительно-сопоставительный анализ возможностей различных видов имитационного моделирования (дискретно-событийного, агентного, системной динамики). В-третьих, концептуальное моделирование, применяемое для разработки абстрактной схемы взаимосвязей элементов системы в условиях инновационных изменений. Такой синтез позволяет не только классифицировать инструменты, но и построить теоретическую модель их применения для управления интеграцией инноваций.

Исследование базируется на методологических принципах системного подхода, что позволяет рассматривать образовательную организацию как целостную систему, обладающую свойствами, которые не сводятся к сумме свойств ее элементов (Гордиенко, 2023). Этот подход особенно важен для понимания сложных динамических процессов интеграции инноваций, которые затрагивают все элементы образовательной системы (Зятева и Питухин, 2021).

В качестве теоретического инструментария применяется концептуальное моделирование, позволившее решить задачу структурирования предметной области. С его помощью были выделены и описаны базовые сущности (агенты), процессы (учебные, административные) и взаимосвязи, характерные для интеграции инноваций в учебную деятельность. Это создало четкую схему для последующего анализа того, какие аспекты этой системы могут быть описаны средствами разных имитационных подходов.

В качестве теоретического инструментария применяется концептуальное моделирование, позволяющее «увязать воедино многочисленные процессы и проследить влияние различных условий, то есть входных данных» (Панибратцев, 2025). Этот метод обеспечивает возможность абстрактного представления процессов интеграции инноваций и выявления системных взаимосвязей между их элементами.

Сравнительно-сопоставительный анализ используется для выявления общих закономерностей и специфических особенностей применения различных видов имитационного моделирования в образовательном контексте (Мирошниченко и др., 2021). Этот метод позволяет систематизировать накопленный научный опыт и определить перспективные направления теоретического осмысления проблемы (Круглов и Ляшенко, 2025).

Систематизация методологических подходов осуществляется на основе анализа классификаций, предложенных в научной литературе. В частности, принимается во внимание классификация, которая выделяет «три основных вида имитационного моделирования: дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование и системная динамика» (Антошков, 2025), которая дополняется и уточняется в контексте задач настоящего исследования. Развитие классификации заключается в установлении четкой корреляции между уровнем управления и спецификой моделируемых инновационных процессов. Для задач интеграции инноваций данные подходы должны рассматриваться не как альтернативные, а как иерархически сопряженные, где результаты моделирования одного уровня могут служить входными параметрами для другого, формируя методологическую основу для создания гибридных моделей.

Процедура исследования включала последовательную реализацию следующих этапов:

- концептуализации основных понятий исследования;
- анализа и систематизации существующих теоретических подходов;
- выявления методологических проблем и ограничений;
- разработки теоретической модели применения имитационного моделирования для управления процессами интеграции инноваций (см. подраздел «Теоретическая модель интеграции инноваций»);
- формулирования методологических рекомендаций.

Особое внимание уделялось выявлению специфики различных видов имитационного моделирования применительно к задачам управления инновационными процессами. «Имитационное моделирование – наиболее востребованный метод моделирования, также этот метод позволяет строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности» (Стерлягов и др., 2019), что делает его особенно ценным для прогнозирования последствий внедрения инноваций.

3.1. Теоретическая модель интеграции инноваций

Центральным результатом исследования является разработка теоретической модели, описывающей системные взаимосвязи между элементами образовательной организации в процессе интеграции инноваций. Разработанная модель представляет образовательную организацию как адаптивную систему, в которой процесс интеграции инноваций затрагивает четыре взаимосвязанных блока:

1. субъекты (администрация, преподаватели, студенты, трудовые ресурсы) с их установками и компетенциями;
2. процессы учебной и организационной деятельности;
3. ресурсы (временные, материальные, информационные, трудовые);
4. внешнюю среду (нормативные требования, рынок труда).

Выделение этих блоков обусловлено их ключевой ролью в функционировании образовательной организации. Каждый блок является важным компонентом системы, влияющим на другие элементы. Такое структурирование отражает динамику взаимодействий и подтверждает системные взаимосвязи между элементами образовательной организации.

При разработке модели были рассмотрены концепции системного анализа организационных систем и подходы к моделированию сложных адаптивных сред. В частности, были проанализированы работы, посвященные моделированию образовательных организаций как динамических систем (Зятева и Питухин, 2021; Гордиенко, 2023). Большинство существующих аналогов рассматривает внедрение инноваций как линейный процесс либо как статичную структуру распределения ресурсов, не акцентируя внимание на комплексном взаимодействии всех элементов образовательной среды.

Новизна разработанной модели заключается в интеграции разнородных компонентов образовательной организации в единую адаптивную систему, где ключевую роль играют системные взаимосвязи и обратные связи. Модель акцентирует нелинейность изменений, наличие положительных и отрицательных обратных связей между этими блоками, а также

определяет точки приложения различных методов имитационного моделирования для анализа их динамики. Модель основана на понимании образовательной организации как сложной адаптивной системы, характеризующейся нелинейностью динамических процессов и наличием обратных связей (Вдовиченко, 2020). В рамках этой модели интеграция инноваций рассматривается не как линейный процесс внедрения новых элементов, а как сложный процесс трансформации системных взаимосвязей (Шалкина, 2021).

4. Результаты

Важным результатом стало выявление специфики применения различных видов имитационного моделирования.

Центральным результатом исследования является разработка теоретической модели, описывающей системные взаимосвязи между элементами образовательной организации в процессе интеграции инноваций. Переход от линейного восприятия инноваций к пониманию образовательной организации как сложной адаптивной системы позволяет сфокусироваться на трансформации внутренних взаимосвязей (Вдовиченко, 2020). В этой модели ключевое значение приобретают нелинейная динамика и механизмы обратной связи, определяющих успех системных преобразований при внедрении новшеств (Шалкина, 2021). Модель основана на понимании образовательной организации как сложной адаптивной системы, характеризующейся нелинейностью динамических процессов и наличием обратных связей (Вдовиченко, 2020). В рамках этой модели интеграция инноваций рассматривается не как линейный процесс внедрения новых элементов, а как сложный процесс трансформации системных взаимосвязей (Шалкина, 2021).

Важным результатом стало выявление специфики применения различных видов имитационного моделирования для решения задач управления инновационными процессами. Дискретно-событийное моделирование демонстрирует высокую эффективность для анализа организационных аспектов интеграции инноваций, таких как оптимизация учебных планов и распределения ресурсов. Дискретно-событийное моделирование моделирует систему как последовательность событий, происходящих в отдельные моменты времени (Есенбекова и др., 2017), что позволяет детально анализировать процессуальные аспекты интеграции инноваций.

Агентное моделирование открывает уникальные возможности для исследования социально-психологических аспектов интеграции инноваций, включая адаптацию преподавателей и студентов к новым условиям. Этот подход позволяет моделировать совокупность объектов, каждый из которых обладает определенными чертами и при этом взаимодействует с другими объектами (Веремчук, 2023), что особенно ценно для понимания групповой динамики в процессе внедрения инноваций.

Системная динамика предоставляет инструментарий для исследования долгосрочных последствий интеграции инноваций и выявления системных эффектов (Валиев, 2020). Этот вид моделирования «хорошо подходит для моделирования долгосрочных тенденций и взаимосвязей в сложных системах» (Далаков, 2022), что позволяет прогнозировать отдаленные результаты инновационных преобразований.

Таблица 1. Сравнительный анализ видов имитационного моделирования применительно к задачам интеграции инноваций в учебную деятельность

Критерий анализа	Дискретно-событийное моделирование	Агентное моделирование	Системная динамика
Основной объект моделирования	Процессы и потоки (за-явки, студенты, ресурсы) как последовательность операций.	Активные автономные агенты (студенты, преподаватели, администраторы) и их взаимодействия.	Совокупность взаимосвязанных переменных, характеризующих систему в целом (например, уровень мотивации, качество знаний).
Уровень анализа	Макроуровень, институциональные процессы.	Микро- и мезоуровень, индивидуальное и групповое поведение.	Макроуровень, стратегические тенденции.
Типичные аналитические цели применения в контексте интеграции инноваций интеграции инноваций	Анализ и оптимизация операционных процессов и логистики при внедрении нововведений: составление расписания, распределение аудиторного фонда, логистика учебного процесса.	Моделирование и исследование адаптации участников образовательного процесса к нововведениям, моделирование распространения знаний и формирования психологической совместимости в инновационной среде.	Исследование долгосрочных тенденций и прогнозирование системных эффектов: влияние инноваций на качество подготовки, востребованность выпускников, финансовую устойчивость организации.
Сильные стороны для моделирования инноваций	Позволяет количественно оценить эффективность использования ресурсов и выявить «узкие места» в контексте дискретных процессов с очередями и разделяемыми ресурсами (расписание, аудиторный фонд), где важно точное время (Антошков, 2025).	Дает возможность учесть человеческий фактор, нелинейность поведения, сетевые эффекты и возникновение непредсказуемых паттернов (Веремчук, 2023).	Позволяет работать с агрегированными переменными состояниями системы, динамика которых описывается обратными связями, что удобно для стратегического мышления и сценарного прогнозирования долгосрочных трендов (Далаков, 2022; Сподах и Пителинский, 2018).

Критерий анализа	Дискретно-событийное моделирование	Агентное моделирование	Системная динамика
Методологические ограничения	Слабо учитывает поведенческие аспекты и когнитивные характеристики агентов. Моделирует сущности (например, студентов в потоке), поведение которых задается детерминированными или простыми вероятностными правилами, без учета сложной адаптивности и социального взаимодействия реальных людей («идеальные» исполнители) (Антошков, 2025; Есенбекова и др., 2017).	Высокая сложность калибровки моделей, требование детальных данных о поведении агентов. Результаты могут быть трудны для интерпретации на институциональном уровне (Веремчук, 2023).	Позволяет выявлять и моделировать причинно-следственные петли обратной связи, запасы и потоки между агрегированными переменными системы. Это уникальное преимущество для анализа системных эффектов, возникающих из структуры взаимосвязей (например, как задержки в адаптации кадров влияют на долгосрочное качество образования), и для стратегического сценарного прогнозирования (Сподах и Пителинский, 2018; Валиев, 2020).
Пример практического применения (источник / обоснование)	Моделирование работы деканата при переходе на индивидуальные траектории для оценки требуемого количества тьюторов и времени на согласование планов (Мирошниченко и др., 2021). Обоснование классификации: выбор дискретно-событийного подхода обусловлен спецификой задачи как системы массового обслуживания с очередями. Ключевыми событиями, определяющими динамику модели, являются: «поступление заявки на тьюторское	Моделирование процесса внедрения смешанного обучения для изучения адаптации разных типов преподавателей (новаторы, консерваторы) и распространения практик (Веремчук и Привалова, 2023). Обоснование классификации: модель фокусируется на взаимодействии автономных агентов (преподавателей) с различными поведенческими правилами,	Построение прогнозной модели влияния цифровизации курсов на уровень подготовки студентов и репутацию вуза в долгосрочной перспективе (Шалкина, 2021). Обоснование классификации: автор исследует системные взаимосвязи и долгосрочные тренды (качество, репутация), используя агрегированные переменные и

Критерий анализа	Дискретно-событийное моделирование	Агентное моделирование	Системная динамика
	сопровождение», «назначение консультации», «завершение согласования индивидуального плана». Использование данного подхода позволяет выявить «узкие места» в административных регламентах и оптимизировать временные затраты персонала, что критически важно на этапе операционного внедрения инновации.	что является ключевой особенностью агентного моделирования.	причинно-следственные циклы, что соответствует методологии системной динамики.
Потенциал для интеграции (гибридизации) с другими подходами	Может предоставлять агрегированные данные о потоке процессов (например, время обработки заявок) для калибровки переменных в моделях системной динамики.	Результаты моделирования индивидуального поведения и взаимодействий могут агрегироваться для формирования правил или параметров на макроуровне в моделях системной динамики или задавать входящие потоки для дискретно-событийных моделей.	Задаёт макроструктуру и стратегические ограничения, в рамках которых могут развиваться более детализированные агентные или дискретно-событийные модели операционного уровня.

Источник: составлено автором по (Антошков, 2025; Веремчук, 2023; Далаков, 2022; Сподах и Пителинский, 2018; Есенбекова и др., 2017; Валиев, 2020; Мирошниченко и др., 2021; Веремчук и Привалова, 2023; Шалкина, 2021).

Важным результатом исследования стала систематизация потенциала и ограничений различных видов имитационного моделирования применительно к задачам управления инновациями. Проведенный сравнительный анализ, представленный в табл. 1, позволяет продемонстрировать, что выбор конкретного метода имитационного моделирования должен быть напрямую увязан с характером решаемой задачи и уровнем происходящих в образовательной организации процессов.

Так, если стоит задача оптимизации ресурсного обеспечения нового учебного процесса, наиболее адекватным инструментом выступает дискретно-событийное моделирование. Оно позволяет, как отмечает А.В. Антошков, моделировать систему как последовательность событий (Антошков, 2025), что идеально подходит для анализа организационных процессов. В свою очередь, для исследования социально-психологических аспектов внедрения инноваций,

таких как адаптация преподавателей, незаменимым становится агентное моделирование, поскольку оно позволяет строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности (Веремчук и Привалова, 2023), с учетом индивидуальных характеристик и поведения каждого участника. Для стратегического планирования и оценки долгосрочных последствий инновационных изменений наиболее релевантны методы системной динамики, ориентированные на выявление фундаментальных тенденций и циклических зависимостей в системе (Сподах и Пителинский, 2018).

Представленная таблица не только классифицирует методы, но и выявляет их комплементарность (см. строку «Потенциал для интеграции (гибридизации) с другими подходами»). Комплексное использование этих подходов, при котором, например, с помощью агентной модели изучается микровзаимодействие, а результаты агрегируются для построения макромоделей системной динамики, открывает путь к созданию целостных и многомерных моделей процессов интеграции инноваций в образовательных организациях. Это особенно актуально в свете исследований, где агентные модели используются для прогнозирования поведения конкретных категорий обучающихся (Конева и Беляева, 2022), что может служить ценными входными данными для моделей более высокого уровня.

Значимым результатом исследования является выявление методологических ограничений имитационного моделирования в контексте управления инновационными процессами. Разработка и внедрение имитационных моделей требует специальных знаний и навыков, а также значительных временных и финансовых затрат (Филипова и Высоцкая, 2018). Кроме того, существует «риск переоценки результатов, так как результаты моделирования являются лишь прогнозом и не гарантируют наступления определенных событий в реальном мире» (Агеева и др., 2018).

Особый теоретический интерес представляет выявление потенциала имитационного моделирования для решения задач образовательной инклюзии в контексте интеграции инноваций, «использования агент-ориентированной модели для оценки поведения людей с ограниченными возможностями с целью прогнозирования их непредсказуемого поведения при обучении в онлайн-среде» (Хаперская и Минин, 2025), что открывает новые перспективы для создания адаптивных образовательных сред.

5. Обсуждение

Полученные результаты позволяют по-новому осмыслить методологические основы применения имитационного моделирования для управления процессами интеграции инноваций в образовательных организациях. Предложенная теоретическая модель расширяет существующие представления о динамике инновационных процессов в образовании и открывает новые возможности для их исследования.

Сравнение полученных результатов с исследованиями других авторов выявляет как преемственность, так и существенные различия в подходах. В отличие от А.А. Макаровой, которая акцентирует внимание на прикладных аспектах имитационного моделирования для решения учебно-практических задач, настоящее исследование раскрывает его потенциал для стратегического управления инновационными процессами. Вместе с тем подтверждается тезис автора о том, что «имитационное моделирование – наиболее востребованный метод моделирования» (Макарова, 2021), особенно в условиях неопределенности и быстрых изменений.

Синтез подходов, предложенных Л.И. Кутеповой и др. и А.В. Панибратцевым, позволяет преодолеть традиционное противопоставление технологических и гуманитарных аспектов интеграции инноваций. Если первые делают акцент на том, что «реализация имитационных технологий позволяет студентам „погрузиться“ в профессиональную деятельность» (Кутепова и др., 2020), а второй обосновывает необходимость «диалектического единства традиций и инноваций» (Панибратцев, 2025), то настоящее исследование демонстрирует возможность интеграции этих подходов в рамках единой методологической парадигмы. В частности, концепция «погружения в профессиональную деятельность» и принципы «диалектического единства традиций и инноваций» позволяют формализовать правила поведения агентов (преподавателей и студентов) в имитационной модели, учитывая их установки и компетенции. Таким образом, их исследования используются для формализации психологических и педагогических переменных, детерминирующих нелинейный характер принятия инноваций в образовательной среде. Это позволяет связать технологический каркас имитационной модели с реальным гуманитарным содержанием образовательного процесса.

Критический анализ выявленных методологических ограничений позволяет скорректировать излишне оптимистичные оценки потенциала имитационного моделирования, которые встречаются в некоторых исследованиях. Однако «существует риск переоценки результатов, так как результаты моделирования являются лишь прогнозом» (Бондарь и др., 2021), что особенно значимо в контексте управления инновациями, где велика степень неопределенности.

Особого обсуждения заслуживает выявленный потенциал имитационного моделирования для решения задач образовательной инклюзии. Подход, предложенный А.В. Хаперской и М.Г. Мининым, который предполагает «визуализацию процесса обучения с помощью моделирования, а также использование агент-ориентированной модели для оценки поведения людей с ограниченными возможностями» (Хаперская и Минин, 2025), открывает новые горизонты для создания персонализированных образовательных траекторий в условиях интеграции инноваций.

Важным аспектом обсуждения является соотношение теоретического и прикладного потенциала имитационного моделирования. Если зарубежные исследователи акцентируют внимание на «повышении мотивации слушателей, развитии критического мышления, повышенном интересе к обучению за счет индивидуального подхода», то настоящее исследование демонстрирует, что методологическая ценность имитационного моделирования выходит далеко за рамки решения прикладных задач.

6. Заключение

Проведенное теоретическое исследование позволяет сформулировать следующие выводы, раскрывающие научные результаты работы:

- установлено, что имитационное моделирование является действенным методологическим инструментом для анализа процессов интеграции инноваций, поскольку позволяет формализовать и исследовать системную сложность и нелинейную динамику этих процессов в образовательной организации;

- проведенный сравнительный анализ показал, что различные виды имитационного моделирования (дискретно-событийное, агентное, системная динамика) обладают комплементарным (взаимодополняющим) потенциалом для решения разноуровневых задач управления инновационными процессами, что обусловлено их специфическими

методологическими особенностями, позволяющими анализировать операционные, социально-психологические и стратегические аспекты изменений соответственно;

– разработанная теоретическая модель интеграции инноваций, основанная на принципах системного подхода и концептуального моделирования, позволяет преодолеть фрагментарность существующих исследований и задает целостную схему для анализа динамики инновационных процессов в образовании;

– выявленные методологические ограничения имитационного моделирования (сложность разработки моделей, риск переоценки результатов, зависимость от качества исходных данных) требуют разработки специальных методик верификации и валидации моделей в контексте управления инновациями;

– на основе анализа литературы выявлен потенциал имитационного моделирования, в частности агентного подхода, для решения задач образовательной инклюзии, что открывает новые перспективы для создания адаптивных образовательных сред в условиях интеграции инноваций.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой интегративных моделей, сочетающих различные виды имитационного моделирования, а также с углубленным изучением методологических аспектов верификации и валидации моделей инновационных процессов в образовании.

Список литературы

- Brigas, C.J., 2019. Modeling and Simulation in an Educational Context: Teaching and Learning Sciences. *Research in Social Sciences and Technology* 4 (2), 1–12. <https://doi.org/10.46303/ressat.04.02.1>
- Campos, N., Nogal, M., Caliz, C., Juan, A.A., 2020. Simulation-based learning using online and offline models in various European universities. *International Journal of Educational Technology in Higher Education* 17 (8). <https://doi.org/10.1186/s41239-020-0181-y>
- Агеева Е.Л., Аракчеев М.А., Ребриков А.Е. Теория и практика имитационного моделирования в методике обучения безопасности жизнедеятельности бакалавров образования // Проблемы современного педагогического образования. 2018. № 61-1. С. 4–7.
- Антошков А.В. Имитационное моделирование как инновационная педагогическая технология в условиях цифровизации // Человек и образование. 2025. № 2 (83). С. 163–174. <https://doi.org/10.54884/1815-7041-2025-83-2-163-174>
- Бондарь К.М., Дунин В.С., Скрипко П.Б. Сервисы дистанционного образования и информационной безопасности программно-аппаратного комплекса имитационного моделирования геодинамических рисков для градостроительных специальностей // Мир науки, культуры, образования. 2021. № 1 (86), С. 120–122. <https://doi.org/10.24412/1991-5497-2021-186-120-122>
- Валиев А.А. Имитационное моделирование в преподавании военных дисциплин // Проблемы педагогики. 2020. № 6 (51). С. 63–65.
- Вдовиченко А.А. Имитационное моделирование в профессионально ориентированной внеучебной деятельности будущих педагогов-математиков // Гуманитарни Балкански изследвания. 2020. Т. 4. № 2 (8). С. 18–21. <https://doi.org/10.34671/SCH.HBR.2020.0404.0004>
- Веремчук Н.С. Элементы имитационного моделирования в вопросах оптимизации дорожного движения // Вестник кибернетики. 2022. № 4 (48). С. 23–28. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-4-23-28>
- Веремчук Н.С., 2023. Имитационное моделирование в межпредметной интеграции учебных дисциплин // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. Т. 12. № 2. С. 45–52. <https://doi.org/10.24412/2225-8264-2023-2-11-17>
- Веремчук Н.С., Привалова Ю.И. Формирование цифровых компетенций обучающихся технических вузов с использованием имитационного моделирования в учебном процессе // Наука о человеке: гуманитарные исследования. 2023. Т. 17. № 1. С. 100–106.
- Гордиенко, Т.П., Марченко, С.Г. Имитационное моделирование как перспективный метод повышения качества образования // Современное педагогическое образование. 2023. № 4. С. 18–25.
- Далаков М.Х. Имитационное моделирование духовно-нравственных качеств современной молодежи // Управление образованием: теория и практика. 2022. Т. 12. № 6 (52). С. 294–315. <https://doi.org/10.25726/i6464-3777-5085-f>
- Есенбекова А.Э., Джумахметова Л.К., Дусталиева С.М. Имитационное моделирование как главный инструмент конструирования сложных процессов и систем // Технические науки в России и за рубежом: материалы VII Международной научной конференции. М.: Буки-Веди, 2017. С. 165–167.
- Зятева О.А., Питухин Е.А. Концептуальная модель управления показателями научной деятельности вузов // 2021. Инженерный вестник Дона. № 8 (80). С. 202–209.
- Конева А.Ф., Беляева М.Б. Особенности применения программы AnyLogic при изучении имитационного моделирования в старшей школе // Аллея Науки. 2022. № 5 (68). Т. 1. С. 740–744.
- Круглов Д.В., Ляшенко В.Е. Управление рисками при формировании экосистем взаимодействия корпораций и вузов: имитационный подход // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2025. № 3-2 (102). С. 229–336. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2025-3-2-229-236>
- Кутепова Л.И., Гладкова М.Н., Максимова К.А. Имитационные технологии в профессиональном образовании // Балтийский гуманитарный журнал. 2020. Т. 9. № 3 (32). С. 140–142. <https://doi.org/10.26140/bgj3-2020-0903-0031>

- Макарова А.А. Имитационное моделирование как основа решения учебно-практических задач в условиях высшей школы // Вестник Международного института рынка. 2021. № 1. С. 157–163.
- Мирошниченко Ю.Н., Осадская А.А., Щербаков С.М. Учебно-методическое обеспечение дополнительного профессионального образования: имитационное моделирование и оценка трудозатрат // Бюллетень науки и практики. 2021. Т. 7. № 1. С. 340–349. DOI: <https://doi.org/10.33619/2414-2948/62/38>
- Панибратцев А.В. Интеграция традиционных ценностей и инновационных подходов в преподавании гуманитарных наук // Государственная служба. 2025. Т. 27. № 3 (155). С. 104–110.
- Сподах Г.Г., Пителинский К.В. О некоторых методах к оптимизации процессов управления вузом // Вестник Московской международной академии. 2018. № 1. 132–145.
- Стерлягов С.П., Патудин В.М., Краснова М.В. Имитационное моделирование как инструмент реализации предынвестиционной фазы инфраструктурных проектов муниципальных образований // Экономика Профессия Бизнес. 2019. № 2. С. 68–73. <https://doi.org/10.14258/epb201922>
- Филипова А.Г., Высоцкая, А.В. Здоровье и образование детей в российских регионах: от кластеризации к имитационному моделированию // Региональные проблемы. 2018. Т. 21. № 4. С. 107–116. <https://doi.org/10.31433/1605-220X-2018-21-4-107-116>
- Хаперская А.В., Минин М.Г. Инструменты имитационного моделирования и процессного управления для оценки профессиональных компетенций при самостоятельном обучении // Современные проблемы науки и образования. 2025. 1. Ст. № 45. <https://doi.org/10.17513/spno.33882>
- Шалкина Т.Н. Цифровые сервисы в обучении информатике: опыт интеграции методик удаленного и традиционного обучения // Мир науки. Педагогика и психология. 2021. № 3. С. 15–23.

References

- Ageeva, E.L., Arakcheev, M.A., Rebrikov, A.E., 2018. The Theory and Practice of Simulation in Teaching of the Health and Safety of Bachelors of Education. *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya* [Problems of modern pedagogical education] 61-1, 4–7.
- Antoshkov, A.V., 2025. Simulation as an innovative pedagogical technology in the context of digitalization. *Man and Education* 2 (83), 163–174. <https://doi.org/10.54884/1815-7041-2025-83-2-163-174>
- Bondar, K.M., Dunin, V.S., Skripko, P.B., 2021. Services of Distance Education and Information Safety of the Software and Hardware Complex of Simulation of Professional Education of Urban Specialties. *The World of Science, Culture and Education* 1 (86), 120–122. <https://doi.org/10.24412/1991-5497-2021-186-120-122>
- Brigas, C.J., 2019. Modeling and Simulation in an Educational Context: Teaching and Learning Sciences. *Research in Social Sciences and Technology* 4 (2), 1–12. <https://doi.org/10.46303/ressat.04.02.1>
- Campos, N., Nogal, M., Caliz, C., Juan, A.A., 2020. Simulation-based learning using online and offline models in various European universities. *International Journal of Educational Technology in Higher Education* 17 (8). <https://doi.org/10.1186/s41239-020-0181-y>
- Dalakov, M.H., 2022. Simulation modeling of spiritual and moral qualities of modern youth. *Education Management Review*, 12 (6 (52)), 294–315. <https://doi.org/10.25726/i6464-3777-5085-f>
- Filipova, A.G., Vysotskaya, A.V., 2018. Health and Education of Children in Regions of Russia: from Clustering to Imitating Simulation. *Regional Problems* 21 (4), 107–116. <https://doi.org/10.31433/1605-220X-2018-21-4-107-116>
- Gordiyenko, T.P., Marchenko, S.G., 2023. Imitatsionnoye modelirovaniye kak perspektivnyy metod povysheniya kachestva obrazovaniya [Simulation modeling as a promising method for improving the quality of education]. *Sovremennoye pedagogicheskoye obrazovaniye* [Modern pedagogical education] 4, 18–25.
- Khaperskaya, A.V., Minin, M.G., 2025. The Simulation Modelling and Process Mining Tools to Evaluate Professional Competencies in Self-Studying. *Modern Problems of Science and Education* 1, 45–52. <https://doi.org/10.17513/spno.33882>
- Koneva, A.F., Belyaeva, M.B., 2022. Osobennosti primeneniya programmy AnyLogic pri izuchenii imitatsionnogo modelirovaniya v starshey shkole [Features of using the AnyLogic program in studying simulation modeling in high school]. *Alleya Nauki* [Alley of Science] 5 (68) (1), 740–744.
- Kruglov, D.V., Lyashenko, V.E., 2025. Risk Management in the Formation of Ecosystems for Interaction between Corporations and Higher Educational Institutions: A Simulation Approach. *International Journal of Humanities and Natural Sciences* 3-2 (102), 229–336. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2025-3-2-229-236>
- Kutepova, L.I., Gladkova, M.N., Maksimova, K.A., 2020. Imitation Technologies in Vocational Education. *Baltic Humanitarian Journal* 9 (3 (32)), 140–142. <https://doi.org/10.26140/bgz3-2020-0903-0031>
- Makarova, A.A., 2021. Simulation Modeling as a Basis for Solving Educational and Practical Problems in the Conditions of Higher Education. *Vestnik Mezhdunarodnogo instituta rynka* [Bulletin of the International Market Institute] 1, 157–163.
- Miroshnichenko, Yu., Osadskaya, A., Shcherbakov, S., 2021. Methodological Support of Additional Professional Education: Simulation and Labor Costs Estimation. *Bulletin of Science and Practice* 7 (1), 340–349. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/62/38>
- Panibratsev, A.V., 2025. Integrating Traditional Values and Innovative Approaches in Teaching the Humanities. *Public Administration* 27 (3 (155)), 104–110.
- Shalkina, T.N., 2021. Digital Services in the Training Informatics: the Experience of Integrating Distance Learning and Traditional Teaching Methods. *World of Science. Pedagogy and Psychology* 3, 15–23.
- Spodakh, G.G., Pitelinsky, K.V., 2018. Some methods of optimizing university management process. *Bulletin of the Moscow International Academy* 1, 132–145.
- Sterlyagov, S.P., Patudin, V.M., Krasnova, M.V., 2019. Imitation Modeling as a Tool for the Implementation of the Pre-Investmental Phase of Infrastructure Projects of Municipal Entities. *Economics Profession Business* 2, 68–73. <https://doi.org/10.14258/epb201922>
- Valiyev, A.A., 2020. Imitatsionnoye modelirovaniye v prepodavanii voyennykh distsiplin [Simulation modeling in teaching military disciplines]. *Problemy pedagogiki* [Problems of pedagogy] 6 (51), 63–65.
- Vdovichenko, A.A., 2020. Simulation Modeling in Professionally Oriented Extracurricular Activities of Future Math Teachers. *Humanitarian Balkan Research* 4 (2(8)), 18–21. <https://doi.org/10.34671/SCH.HBR.2020.0404.0004>
- Veremchuk, N.S., 2022. Elements of Simulation Modeling in Issues of Traffic Optimization. *Proceedings of Cybernetics* 4 (48), 23–28. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-4-23-28>

- Veremchuk, N.S., 2023. Simulation Modeling in Interdisciplinary Integration of Academic Disciplines. Herald of Siberian Institute of Business and Information Technologies 12 (2), 45–52. <https://doi.org/10.24412/2225-8264-2023-2-11-17>
- Veremchuk, N.S., Privalova, Yu.I., 2023. Formation of Digital Competencies of Students of Technical Universities Using Simulation Modeling in the Educational Process. Russian Journal of Social Sciences and Humanities 17 (1), 100–106.
- Yesenbekova, A.E., Dzhumakhmetova, L.K., Dustaliyeva, S.M., 2017. Imitatsionnoye modelirovaniye kak glavnyy instrument konstruirovaniya slozhnykh protsessov i sistem [Simulation modeling as the main tool for designing complex processes and systems], in: Tekhnicheskiye nauki v Rossii i za rubezhom: materialy VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Technical Sciences in Russia and Abroad: Proceedings of the 7th International Scientific Conference]. Buki-Vedi, Moscow, pp. 165–167.
- Zyateva, O.A., Pitukhin, E.A., 2021. Conceptual Model of Management of Indicators of Scientific Activity of Universities. Engineering Journal of Don 8 (80), 202–209.

Статья поступила в редакцию 19.10.2025, одобрена после рецензирования 25.10.2025, принята к публикации 14.11.2025.

The article was submitted 19.10.2025, approved after reviewing 25.10.2025, accepted for publication 14.11.2025.

Информация об авторах

1. Диана Козикова, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0003-6550-1041>, kozikovadi@gmail.com

About the authors:

1. Diana Kozikova, posten, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-6550-1041>, kozikovadi@gmail.com

Научная статья

УДК 658.511.3

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.5>

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ АДАПТИВНОЙ БИЗНЕС-МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЕ

Кирилл Даниленко*^{}, Ирина Брусакова^{}

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация, danilenko@kirill-viktorovich.ru, brusakovai@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку: danilenko@kirill-viktorovich.ru

Аннотация

Статья посвящена разработке математической модели адаптивной бизнес-модели цифрового предприятия, функционирующего в многокомпонентной среде, и доказательству условий ее устойчивости. Актуальность исследования обусловлена тем, что современные организации подвергаются одновременному воздействию физических, институциональных, рыночных и технологических факторов, однако существующие подходы рассматривают эти факторы изолированно и не обеспечивают формального обоснования условий выживаемости. Методологическую основу исследования составляет интеграция теории активных систем, системной динамики и нелинейной теории управления. Построены причинно-следственная диаграмма и диаграмма потоков и запасов в среде имитационного моделирования VENSIM. Для формального анализа устойчивости применена концепция Input-to-State Stability (ISS) и метод функций Ляпунова. В результате исследования разработана модель с двумя контурами обратной связи – контуром стабильности и контуром адаптации, переключение между которыми осуществляется через критический порог уровня стресса. Доказано, что система обладает ISS-устойчивостью при одновременном выполнении трех условий: ограниченности функции потока внешних возмущений, положительной чувствительности мощности адаптации к величине буферов и положительности функции восполнения буферов в периоды стабильности. Численное моделирование трех сценариев подтвердило теоретические предсказания и продемонстрировало наличие области притяжения равновесного состояния. Полученные результаты расширяют возможности количественного анализа организационной устойчивости и могут применяться для раннего выявления угроз, поддержки инвестиционных решений и разработки стратегий развития цифровых платформ.

Ключевые слова: устойчивость, адаптивная бизнес-модель, многокомпонентная среда, системная динамика, парадоксальное управление, Input-to-State Stability, функция Ляпунова, буферы ресурсов, критический порог.

Цитирование: Даниленко, К., Брусакова, И., 2025. Анализ устойчивости адаптивной бизнес-модели цифрового предприятия в многокомпонентной среде. Sustainable Development and Engineering Economics. 4, 5. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.5>

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

© Даниленко К., Брусакова И., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research Article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.5>

SUSTAINABILITY ANALYSIS OF AN ADAPTIVE DIGITAL ENTERPRISE BUSINESS MODEL IN A MULTI-COMPONENT SYSTEMS

Kirill Danilenko*, Irina Brusakova

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation, danilenko@kirill-viktorovich.ru, brusakovai@mail.ru

*Corresponding author: danilenko@kirill-viktorovich.ru

Abstract

This paper develops a mathematical model of an adaptive business model for a digital enterprise operating in a multi-component environment and proves the conditions for its sustainability. The relevance of the research is determined by the fact that modern organizations are simultaneously exposed to physical, institutional, market, and technological factors; however, existing approaches consider these factors in isolation and do not provide formal justification for viability conditions. The methodological framework of the study integrates active systems theory, system dynamics, and nonlinear control theory. A causal loop diagram and a stock-flow diagram were constructed using the VENSIM simulation environment. The Input-to-State Stability (ISS) concept and the Lyapunov function method were applied for formal stability analysis. As a result, a model with two feedback loops was developed – a stability loop and an adaptation loop, with switching between them occurring through a critical stress threshold. The system was proven to possess ISS stability under three simultaneous conditions: boundedness of the external perturbation flow function, positive sensitivity of adaptation capacity to buffer magnitude, and positivity of the buffer replenishment function during stability periods. Numerical simulation of three scenarios confirmed the theoretical predictions and demonstrated the existence of an equilibrium attraction domain. The results expand the possibilities for quantitative analysis of organizational sustainability and can be applied for early threat detection, investment decision support, and digital platform strategy development.

Keywords: sustainability, adaptive business model, multi-component environment, system dynamics, paradoxical management, Input-to-State Stability, Lyapunov function, resource buffers, critical threshold.

Citation: Danilenko, K., Brusakova, I., 2025. Sustainability analysis of an adaptive digital enterprise business model in a multi-component systems. *Sustainable Development and Engineering Economics* 4, 5. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.4.5>

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

© Danilenko K., Brusakova I., 2025. Published by Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University.

1. Введение

В современных условиях цифровизации экономика и бизнес выступают как сложные многокомпонентные системы, в которых предприятия интегрируются в бизнес-экосистемы, основанные на взаимосвязи платформ, партнерских сетей и цифровой инфраструктуры. Как показано в (Tsai et al., 2022), подобные экосистемы характеризуются высокой гетерогенностью участников, самоорганизацией процессов и динамическими контурами обратной связи, что формирует особые требования к устойчивости и адаптивности бизнес-моделей. Объектом исследования в данной работе выбрано цифровое предприятие, функционирующее в условиях такой многокомпонентной среды, а предметом – его адаптивная бизнес-модель, представляющая собой сложную организационную структуру с активными элементами и нелинейными взаимодействиями.

Актуальность исследования определяется тем, что цифровые предприятия, действующие в условиях постоянно возрастающей турбулентности внешней среды и ускоренного внедрения инновационных технологий, сталкиваются с новыми источниками риска и неопределенности. Как отмечается в (Irajifar et al., 2023) и в работе (Colombi et al., 2023), цифровая трансформация создает как новые возможности для повышения устойчивости, так и дополнительные уязвимости, что требует системного переосмысления подходов к обеспечению устойчивости бизнес-моделей. В отличие от классических предприятий, цифровые структуры опираются на сетевые эффекты, платформенные механики масштабирования и гибкие организационные формы, что приводит к принципиальной зависимости их развития от качества динамических связей между компонентами бизнес-модели и поведения ключевых стейкхолдеров.

Несмотря на значительное развитие теоретического аппарата в области управления организационными системами (Burkov et al., 2012), проблемы комплексного анализа адаптивных бизнес-моделей цифровых предприятий до сих пор не получили исчерпывающего решения. Так, в отечественной теории управления организационными системами, как показано в (Burkov et al., 2012), подробно рассмотрены структуры, где участники обладают собственными интересами и способны принимать эффективные управленческие решения, однако специфика цифровых экосистем и сетевых эффектов в этих подходах остается недостаточно раскрытой. Одновременно международная практика и обзоры демонстрируют значимость анализа экосистемной логики развития в условиях цифровизации, что легло в основу многих работ последних лет (Tsai et al., 2022; Evans & Schmalensee, 2016).

Дальнейший прогресс в понимании устойчивости цифровых бизнес-моделей невозможен без использования современных методов моделирования сложных систем. Методология причинно-следственных диаграмм и потоковых моделей для анализа бизнес-моделей была предложена в (Forrester, 1961) и существенно развита в (Senge, 1990), что позволило формализовать логику обратных связей, сценарные траектории развития и циклы адаптации бизнес-систем. Важным этапом стало применение подходов системной динамики для анализа нелинейности и множественности траекторий в эволюции бизнес-структур, о чем говорится, в частности, в (Schoenenberger et al., 2021), где подчеркивается сложность идентификации ключевых управляющих параметров в крупных моделях.

Однако, как показывают современные обзоры, до настоящего времени отсутствует интегрированная методология, позволяющая связать теорию активных организационных систем,

системную динамику и современные концепции цифровых бизнес-экосистем для задач анализа устойчивости именно адаптивных бизнес-моделей цифровых предприятий.

Целью исследования является разработка математической модели адаптивной бизнес-модели для класса цифровых предприятий, функционирующих в многокомпонентной среде, и доказательство условий ее устойчивости методом Input-to-State Stability (ISS).

2. Обзор литературы

В данном разделе представлен систематический обзор современных исследований, посвященных теоретическим и методологическим основам анализа устойчивости адаптивных бизнес-моделей цифровых предприятий. Обзор структурирован вокруг четырех ключевых направлений: теории управления организационными системами и активных систем; системной динамики и агентного моделирования; цифровых бизнес-экосистем и платформенных моделей; динамики и устойчивости бизнес-моделей в контексте цифровой трансформации и устойчивого развития. Анализ включает около сорока источников, с акцентом на публикации 2021–2024 гг., что позволяет выявить актуальные тенденции и существующие научные разрывы.

2.1. Теория управления организационными системами и концепция активных систем

Теоретическая база исследования опирается на разработки в области теории управления организационными системами и теории активных систем, представленные в работах отечественных авторов. В (Burkov et al., 2012) представлена комплексная методология системного анализа организационных структур, учитывающая целевую неоднородность элементов, конфликты интересов и необходимость построения эффективных механизмов управления. Авторы показывают, что в активных системах, где участники обладают собственными интересами и способны к самостоятельному выбору действий, требуются специальные инструменты координации и управления.

В последующих исследованиях концепция активных систем была адаптирована к анализу крупномасштабных экономико-производственных систем. В (Rodionov et al., 2018) подчеркивается, что устойчивость таких систем достигается через сочетание структурного и институционального анализа, что позволяет учитывать как внутренние взаимозависимости, так и внешние возмущения.

Однако, как отмечается в критическом анализе литературы, теория активных систем традиционно применялась к классическим иерархическим организациям и не в полной мере учитывает специфику цифровых бизнес-моделей, основанных на сетевых эффектах и платформенной логике. В (Alqahtani et al., 2020) показано, что цифровая трансформация требует новых подходов к организационной архитектуре, но формализация этих подходов в терминах активных систем остается незавершенной. Таким образом, существует методологический разрыв между теоретическим аппаратом управления организационными системами и практическими потребностями цифровых предприятий, что подтверждает актуальность разработки интегрированной методологии.

2.2. Системная динамика и агентное моделирование в анализе бизнес-моделей

Системная динамика и агентное моделирование представляют ключевые методы для формализации динамики сложных социально-экономических систем. Классический подход

системной динамики был предложен в (Forrester, 1961) и существенно развит в (Senge, 1990), где детально описана методология причинно-следственных диаграмм и диаграмм «запасы–поток» для анализа поведения организационных систем.

Важным направлением стало применение системной динамики к задачам цифровой трансформации и устойчивого развития. В (Pasqualino et al., 2021) представлена модель IN4.0-SD, основанная на системной динамике, которая позволяет анализировать взаимосвязь индустриальных инноваций, неравенства и инфляции в замкнутой экономической системе. Авторы показывают, что системная динамика эффективно справляется с моделированием переходных процессов в социально-экономических системах, что делает ее применимой для анализа адаптивных бизнес-моделей.

В работах последних лет активно исследуются методы агентного моделирования для описания поведения стейкхолдеров в цифровых экосистемах. В (Bonabeau et al., 1999) системная динамика сочетается с агентным подходом для моделирования инноваций бизнес-моделей в цифровых компаниях, где партнерские отношения и внешние возможности играют ключевую роль. В (Speich & Ulli-Beer, 2021) показано, как сочетание системной динамики и исследовательского модельного анализа позволяет оценивать перспективы технологических бизнес-моделей в условиях глубокой неопределенности.

Важным для нашего исследования является исследование (Schoenenberger et al., 2021), где подчеркивается, что идентификация влиятельных параметров в больших системных моделях является ключевой проблемой, особенно в условиях ограниченности данных и высокой размерности модели. Это напрямую относится к задаче анализа устойчивости адаптивных бизнес-моделей, где число взаимодействующих факторов может быть значительным. В работе по системной динамике в предпринимательстве и управлении инновациями (Hussain & De Vries, 2024) показано, что применение системной динамики в инженерии предприятий становится все более распространенным, но при этом отмечаются высокая фрагментация исследований и недостаток интегрированных подходов, сочетающих системную динамику с агентным моделированием.

2.3. Динамика и устойчивость бизнес-моделей в цифровых условиях

Ключевой блок литературы посвящен непосредственно динамике и устойчивости бизнес-моделей. В (Lambert & Davidson, 2019) критикуются статические фреймворки бизнес-моделей и предлагают подходы к включению временного измерения, контуров обратной связи и изменений конфигурации ценностного предложения. Это приближает традиционные концепции к логике системной динамики, но не связывает их с формальным анализом устойчивости активных систем.

В (Brenner & Guerrero, 2018) рассматриваются трансформативные устойчивые бизнес-модели в контексте цифрового императива, где подчеркивается необходимость переосмысления ценностных предложений и цепочек создания стоимости в сторону устойчивых решений. В (Østergaard et al., 2020) показано, что цифровизация изменяет промышленные цепочки создания стоимости, но сохраняются пробелы в понимании того, как трансформация бизнес-моделей позволяет достигать экологических и социальных эффектов устойчивости.

В работах по цифровой трансформации в розничной торговле и (Colombi et al., 2023) анализируются детерминанты преобразования традиционных бизнес-моделей, но динамический анализ устойчивости получающихся моделей не проводится. В (Tolstyykh, T. et al., 2020)

выделяются классические и экосистемные эффекты, влияющие на устойчивость высокотехнологичных бизнес-моделей.

Важные результаты получены в работах, сочетающих системную динамику с анализом бизнес-моделей. В (Speich & Ulli-Beer, 2021) показано, как сочетание системной динамики и исследовательского модельного анализа позволяет оценивать перспективы технологических бизнес-моделей в условиях глубокой неопределенности.

В работе по системной динамике в предпринимательстве (Hussain & De Vries, 2024) отмечается рост применения системной динамики в инженерии предприятий, но также фиксируется высокая фрагментация исследований и недостаток интегрированных подходов, сочетающих системную динамику с агентным моделированием. В (Macal & North, 2010) демонстрируется применение системной динамики для моделирования инноваций бизнес-моделей в цифровых компаниях с учетом партнерских сценариев.

2.4. Выводы по обзору литературы и выявленный научный разрыв

Анализ литературы выявил четыре направления исследований, каждое из которых вносит вклад в понимание адаптивных бизнес-моделей, но имеет ограничения. Теория активных систем (Burkov et al., 2012; Rodionov et al., 2018) предоставляет концептуальную основу для анализа организаций как многокомпонентных систем, однако не включает механизмы адаптации в динамичной среде. Системная динамика (Forrester, 1961; Senge, 1990; Schoenenberger et al., 2021) обеспечивает инструментарий для моделирования причинно-следственных связей и потоков, но не предоставляет формальных методов доказательства устойчивости. Агентное моделирование цифровых платформ (Tsai et al., 2022; Evans & Schmalensee, 2016) фокусируется на взаимодействиях стейкхолдеров, не рассматривая механизмы управления устойчивостью. Концепция устойчивых бизнес-моделей (Lambert et al., 2019; Macal & North, 2010; Vonabeau et al., 1999) подчеркивает важность адаптации, но остается на качественном уровне без математических методов анализа. Таким образом, выявляется значительный научный разрыв между, с одной стороны, развитым теоретико-методологическим аппаратом теории активных систем, системной динамики и моделирования цифровых экосистем, а с другой – практической потребностью в инструментах формального анализа устойчивости адаптивных бизнес-моделей цифровых предприятий в многокомпонентной среде.

Таким образом, существующие подходы не интегрируют теорию активных систем, системную динамику и методы формального анализа устойчивости в единую модель. Настоящая работа направлена на устранение этого пробела путем разработки математической модели адаптивной бизнес-модели цифрового предприятия с формальным доказательством условий устойчивости ISS-методом.

3. Материалы и методы

В данном разделе описывается методологический подход к анализу устойчивости адаптивной бизнес-модели цифрового предприятия как многокомпонентной активной системы с использованием методов системной динамики и агентного моделирования. Методика изложена таким образом, чтобы другой исследователь мог ее воспроизвести для аналогичного предприятия при наличии сопоставимых данных.

3.1. Общая схема методологического подхода

Исследование выполнено в рамках системно-динамического подхода с применением методов нелинейной теории управления. Общая логика работы включает четыре последовательных этапа, каждый из которых опирается на результаты предыдущего.

На первом этапе строится базовая модель бизнес-модели цифрового предприятия. Используются методы теории активных систем (Burkov et al., 2012) и системной динамики (Forrester, 1961; Sterman, 2000). Результатом этапа являются причинно-следственная диаграмма (Causal Loop Diagram, CLD) и диаграмма потоков и запасов (Stock-Flow Diagram, SFD), описывающие структуру и динамику бизнес-модели в стационарных условиях. Эта модель фиксирует ключевые переменные (пользовательская база, финансовые резервы, качество инфраструктуры, партнерская экосистема) и контуры обратной связи между ними.

На втором этапе базовая модель расширяется для учета многокомпонентной среды. Вводятся дополнительные элементы: вектор внешних возмущений $w(t)$, агрегированный уровень стресса $S(t)$, вектор буферов $B(t)$ и механизм парадоксального управления с критическим порогом S_{crit} . Статичные контуры обратной связи базовой модели трансформируются в два динамических режима – режим стабильности и режим адаптации. Результатом этапа являются расширенные CLD и SFD адаптивной бизнес-модели.

На третьем этапе проводится формальный анализ устойчивости расширенной модели. Применяются ISS-концепция и метод функций Ляпунова (Sontag, 2008; Khalil, 2002). Строится явная функция Ляпунова $V(S, B)$, доказываются условия ее положительной определенности и диссипативности, формулируется теорема об ISS-устойчивости адаптивной бизнес-модели.

На четвертом этапе выполняется численная верификация теоретических результатов. В среде имитационного моделирования VENSIM реализуется Stock-Flow-модель, проводится серия вычислительных экспериментов при различных сценариях внешних возмущений. Результаты моделирования сопоставляются с предсказаниями теоретического анализа.

3.2. Базовая модель бизнес-модели цифрового предприятия

Модель описывает четыре переменные состояния: пользовательская база $U(t)$, финансовые резервы $F(t)$, качество инфраструктуры $Q(t)$, партнерская экосистема $P(t)$.

На основе анализа взаимосвязей между переменными состояниями построена причинно-следственная диаграмма (рис. 1). Диаграмма отражает три усиливающих контура обратной связи (R1, R2, R3), обеспечивающих механизмы роста, и три балансирующих контура (B1, B2, B3), ограничивающих рост и создающих риски устойчивости.

Модель включает три усиливающих контура (R1 – сетевые эффекты, R2 – инновационный цикл, R3 – развитие партнерства) и три балансирующих контура (B1 – насыщение рынка, B2 – конкуренция, B3 – ресурсные ограничения).

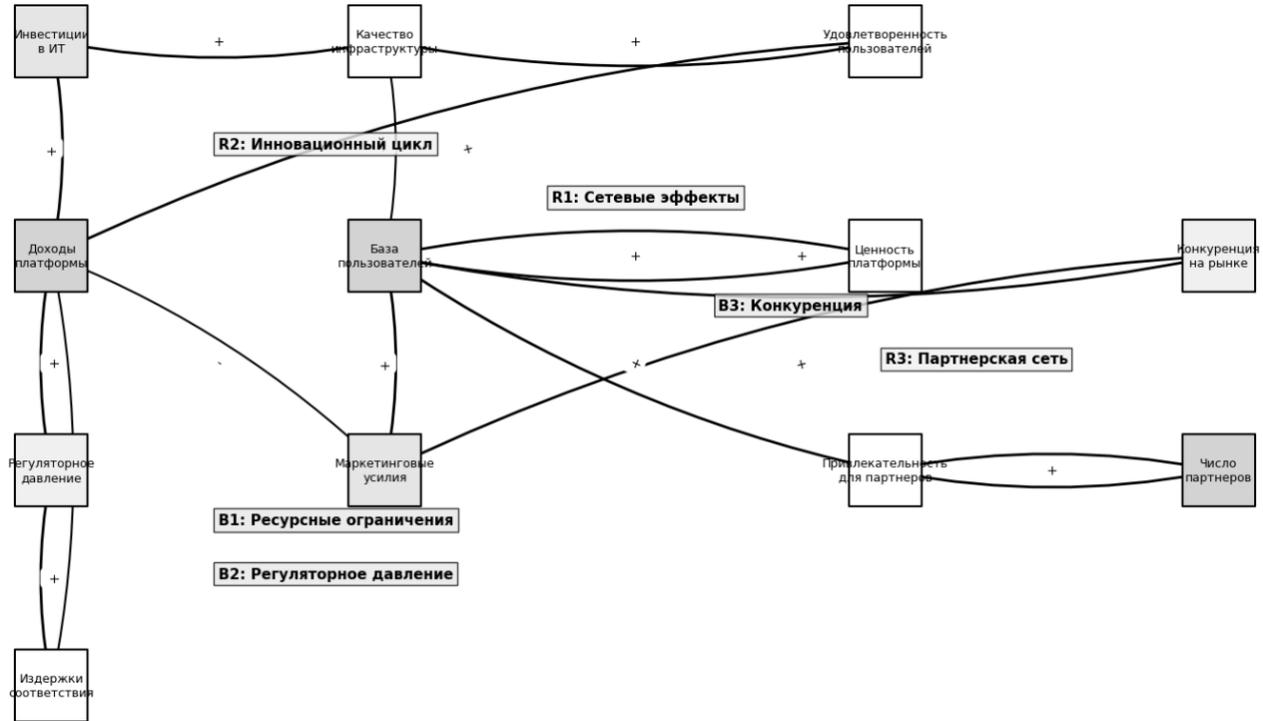


Рисунок 1. Причинно-следственная диаграмма бизнес-модели цифрового предприятия

Для количественного анализа причинно-следственная диаграмма формализована в виде диаграммы потоков и запасов (рис. 2). Каждая переменная состояния представлена как запас (stock), динамика которого определяется входящими и исходящими потоками (flows).

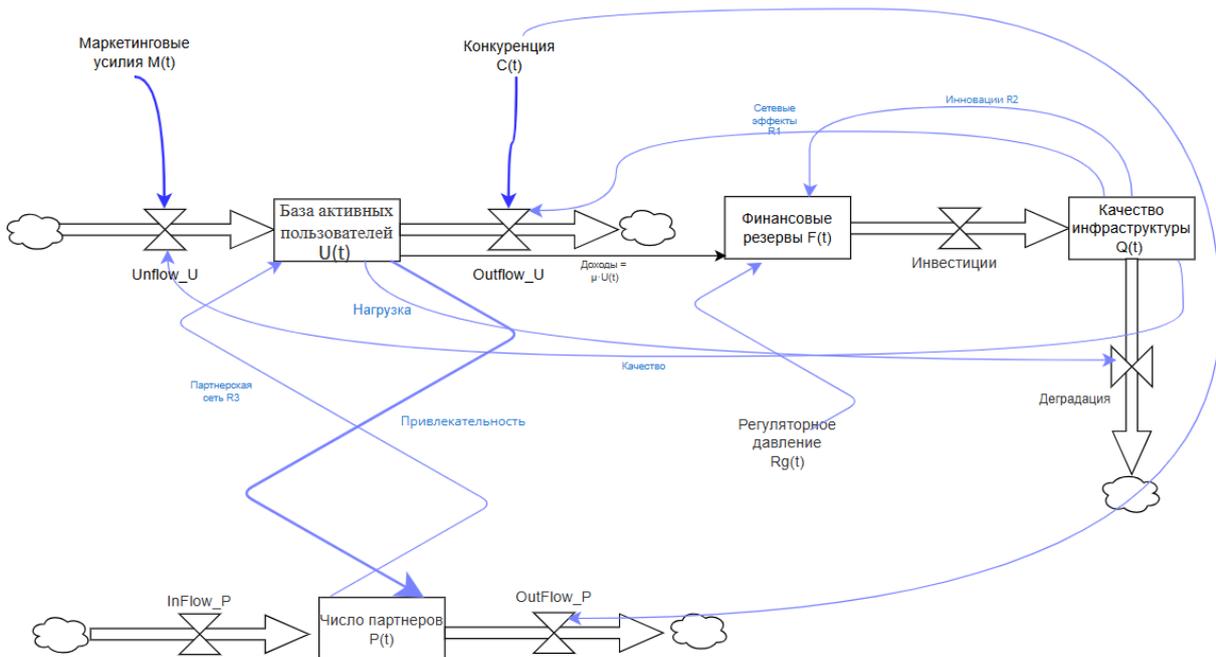


Рисунок 2. Модель «запасы–потоки» бизнес-модели цифрового предприятия

Математически динамика каждого запаса описывается дискретным уравнением:

$$X(t + \Delta t) = X(t) + (Inflow(t) - Outflow(t)) \cdot \Delta t,$$

где X – значение запаса в момент времени t , $Inflow$ и $Outflow$ – потоки пополнения и выбытия, Δt – временной шаг моделирования. Каждый поток задается в виде функции от текущих значений запасов, управляющих параметров и параметров внешней среды.

Для базы пользователей потоки определяются следующим образом:

$$Inflow_U(t) = \alpha_m \cdot M(t) \cdot \left(1 - \frac{U(t)}{U_{max}}\right) + \alpha_n \cdot U(t) \cdot \frac{V(t)}{V_0}, Outflow_U(t) = \beta_u \cdot U(t) \cdot \left(1 - \frac{Q(t)}{Q_0}\right),$$

где $M(t)$ – маркетинговые усилия, α_m – коэффициент эффективности маркетинга, U_{max} – максимальная емкость рынка, α_n – коэффициент сетевых эффектов, $V(t)$ – ценность платформы, V_0 – базовая ценность, β_u – коэффициент оттока, $Q(t)$ – качество инфраструктуры, Q_0 – базовое качество. Аналогичным образом задаются функции потоков для других запасов.

Базовая модель адекватно описывает динамику бизнес-модели в условиях относительно стабильной внешней среды. Она имеет три ограничения: отсутствие явного учета внешних возмущений, единственный режим функционирования и отсутствие интегрального индикатора состояния системы.

Эти ограничения обуславливают необходимость расширения модели, которое выполняется на втором этапе исследования.

3.3. Расширение модели для многокомпонентной среды

Многокомпонентная среда характеризуется одновременным воздействием разнородных факторов, которые не могут быть сведены к единому источнику возмущений. Эти четыре компоненты объединяются в вектор возмущений $w(t)$, который является входом расширенной модели.

Для обеспечения возможности формального анализа устойчивости переменные базовой модели агрегируются в две переменные состояния:

1. Уровень стресса $S(t)$ – интегральный показатель напряженности системы. Он аккумулирует воздействие внешних возмущений и отражает степень отклонения системы от нормального функционирования. Уровень стресса связан с переменными базовой модели: когда пользовательская база падает, финансы истощаются, качество снижается или партнеры уходят – стресс растет.

2. Вектор буферов $B(t)$ – агрегированный запас ресурсов, обеспечивающий способность абсорбировать шоки. Включает финансовые резервы (соответствует $F(t)$ базовой модели), материальные запасы, резервные мощности (связано с $Q(t)$) и компетентностный буфер (связано с партнерскими компетенциями $P(t)$).

Таким образом, четыре переменные базовой модели (U, F, Q, P) трансформируются в две переменные расширенной модели (S, B), что упрощает анализ устойчивости при сохранении содержательной интерпретации.

3.3.1. Трансформация контуров обратной связи

Контур обратной связи базовой модели трансформируется в два метаконтур, реализующих концепцию парадоксального управления (Ricciardi et al., 2016; Smith & Lewis, 2011).

Контур стабильности R1 объединяет механизмы поддержания текущей деятельности. Он соответствует балансирующим контурам базовой модели (B1, B2, B3) и части усиливающих контуров, связанных с реинвестированием в текущие операции. Контур активен при низком уровне стресса и обеспечивает минимизацию отклонений, оптимизацию процессов и накопление буферов.

Контур адаптации R2 объединяет механизмы трансформации. Он соответствует усиливающим контурам базовой модели (R1, R3), связанным с поиском новых пользователей и развитием партнерской экосистемы. Контур активируется при высоком уровне стресса и обеспечивает поиск новых решений, реконфигурацию бизнес-модели и интенсивный расход буферов на трансформацию.

3.3.2. Механизм парадоксального управления

Центральным элементом расширенной модели является механизм парадоксального управления, осуществляющий переключение между контурами R1 и R2. Вводятся критический порог стресса S_{crit} и адаптивная функция переключения $\lambda(t)$.

При уровне стресса ниже критического порога ($S < S_{crit}$) доминирует контур стабильности: система работает в штатном режиме, минимизирует расход буферов, накапливает ресурсы. При уровне стресса выше критического порога ($S > S_{crit}$) активируется контур адаптации: система переходит в режим интенсивной трансформации, расходует буферы на поиск новых решений и реконфигурацию.

Функция переключения $\lambda(t)$ обеспечивает гладкий переход между режимами, избегая резких скачков в поведении системы.

Расширенная модель не отменяет базовую, а надстраивается над ней, добавляя элементы, необходимые для анализа устойчивости в многокомпонентной среде. Математическая формализация расширенной модели и доказательство условий устойчивости представлены в главе 4.

4. Результаты

4.1. Адаптивная бизнес-модель многокомпонентной среды: концептуальная основа

Современные бизнес-модели функционируют в условиях многокомпонентной среды, характеризующейся одновременным воздействием разнородных факторов: физических (инфраструктурные ограничения, логистические сети), институциональных (регуляторные изменения, стандарты), рыночных (конкурентное давление, изменение спроса) и технологических (инновационные сдвиги, устаревание технологий).

Формализуем вектор возмущений многокомпонентной среды следующим образом. Обозначим через $w_{fiz}(t)$ интенсивность физических возмущений, $w_{inst}(t)$ – интенсивность институциональных возмущений, $w_{ryn}(t)$ – интенсивность рыночных возмущений, $w_{tex}(t)$ – интенсивность технологических возмущений. Тогда вектор возмущений имеет вид:

$$w(t) = (w_{fiz}(t) w_{inst}(t) w_{ryn}(t) w_{tex}(t)),$$

где каждая компонента $w(t)$ представляет интенсивность соответствующего типа возмущений в момент времени t . Существенным отличием от моделей цифровых экосистем (Tsai et al., 2022) является отсутствие предположения о доминировании какого-либо одного типа возмущений – система должна сохранять устойчивость при произвольных комбинациях компонент вектора $w(t)$.

Центральный вопрос исследования: при каких условиях адаптивная бизнес-модель сохраняет устойчивость, то есть способность возвращаться к функциональному состоянию после воздействия возмущений ограниченной интенсивности. Традиционные подходы к обеспечению устойчивости бизнес-моделей основываются на принципе оптимизации – поиске единственной конфигурации параметров, максимизирующей целевую функцию при заданных ограничениях (Burkov et al., 2012). Однако в условиях многокомпонентной среды с высокой неопределенностью оптимальная конфигурация является динамической и зависит от текущего состояния системы и характера возмущений.

Концепция парадоксального управления, развитая в работах (Ricciardi et al., 2016; Smith & Lewis, 2011), предлагает альтернативный подход: вместо выбора между противоположными стратегиями (exploitation vs. exploration, stability vs. flexibility) организация должна развивать способность к динамическому переключению между ними. Применительно к проблеме устойчивости это означает наличие двух взаимодополняющих режимов функционирования.

Режим стабильности (контур R1). Система минимизирует отклонения от целевого состояния, используя накопленные буферы и стандартизированные процедуры. Математически это соответствует балансирующей обратной связи, которая имеет вид:

$$u_{stability}(t) = -K_1 \cdot (x(t) - x^*),$$

где x^* обозначает целевое состояние, $K_1 > 0$ – коэффициент стабилизации.

Режим адаптации (контур R2). Система активно трансформирует свою структуру в ответ на существенные изменения среды, что может временно увеличивать отклонения, но обеспечивает долгосрочную жизнеспособность. Это соответствует усиливающей обратной связи с элементами обучения:

$$u_{adaptation}(t) = K_2 \cdot \nabla_x J(x, w) + \eta(t),$$

где $J(x, w)$ обозначает функцию приспособленности к текущим условиям среды, $\eta(t)$ – стохастическая компонента поиска новых решений.

Ключевым элементом адаптивной бизнес-модели является узел парадоксального управления $u_{paradox}$, осуществляющий взвешенное переключение между режимами:

$$u_{paradox}(t) = (1 - \lambda(t)) \cdot u_{stability}(t) + \lambda(t) \cdot u_{adaptation}(t),$$

где $\lambda(t)$ обозначает адаптивную функцию переключения, принимающую значения в интервале от 0 до 1, и определяется текущим уровнем стресса системы.

В контексте адаптивной бизнес-модели многокомпонентной среды буферы представляют собой запасы ресурсов различной природы, позволяющие абсорбировать внешние шоки без немедленной деградации ключевых функций.

Вектор буферов формализуется следующим образом. Обозначим через $B_{finans}(t)$ финансовые резервы, $B_{zapas}(t)$ – материальные запасы, $B_{moshn}(t)$ – резервные мощности, $B_{komp}(t)$ – компетентностный буфер. Тогда:

$$B(t) = (B_{finans}(t) B_{zapas}(t) B_{moshn}(t) B_{komp}(t)).$$

Динамика буферов определяется балансом процессов пополнения и расхода:

$$\frac{dB_i}{dt} = \rho_i(S, B, \pi) - \delta_i(S, B, w) \cdot B_i(t),$$

где ρ_i – функция пополнения i -го буфера, зависящую от уровня стресса S , текущего состояния буферов B и прибыльности системы π ; δ_i – функция расхода, возрастающая при увеличении внешних возмущений w .

Критическим является понятие эффективности буфера – способности буферных запасов снижать уровень стресса системы:

$$\varepsilon_B(B) = \frac{\partial}{\partial B} \left(-\frac{dS}{dt} \right) > 0.$$

Положительность эффективности буфера означает, что увеличение буферных запасов при прочих равных условиях ускоряет снижение уровня стресса, что является необходимым условием устойчивости.

Для агрегированного описания состояния адаптивной бизнес-модели вводится понятие уровня стресса $S(t)$, которое представляет собой меру отклонения системы от устойчивого функционирования. Уровень стресса аккумулирует воздействие внешних возмущений и отражает степень напряженности адаптационных механизмов. Предполагается, что $S(t) \geq 0$.

Динамика уровня стресса описывается дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\frac{dS}{dt} = \phi_{shock}(w(t)) - \alpha(S, B) \cdot S(t).$$

Первый член в правой части уравнения обозначает поток шоков, второй член обозначает адаптацию. Здесь функция ϕ_{shock} преобразует вектор внешних возмущений в скалярную величину притока стресса. Мощность адаптации $\alpha(S, B)$ характеризует скорость снижения стресса за счет внутренних механизмов системы, причем $\alpha(S, B) > 0$.

Функция потока шоков может быть специфицирована различными способами в зависимости от характера взаимодействия компонент среды. Приведем линейную спецификацию:

$$\phi_{shock}(w) = \sum_{i=1}^4 \omega_i \cdot (0, w_i),$$

где $\omega_i > 0$ обозначает весовые коэффициенты, отражающие чувствительность системы к i -му типу возмущений.

Мощность адаптации $\alpha(S, B)$ является ключевым параметром, связывающим состояние буферов с динамикой стресса:

$$\alpha(S, B) = \alpha_0 + \alpha_B \cdot g(B) - \alpha_S \cdot h(S),$$

где:

1. $\alpha_0 > 0$ обозначает базовую мощность адаптации;
2. $g(B) \geq 0$ – возрастающая функция от агрегированного уровня буферов;
3. $h(S) \geq 0$ – возрастающая функция, отражающая снижение адаптационных способностей при высоком стрессе;
4. коэффициенты $\alpha(S)$ и $\alpha(B)$ положительны и характеризуют чувствительность.

Существенной особенностью адаптивной бизнес-модели является наличие критического порога стресса S_{crit} , при превышении которого происходит качественное изменение динамики системы. Данный порог определяет границу между режимами согласно следующей формуле:

$$\lambda(t) = \sigma\left(\frac{S(t) - S_{crit}}{\Delta S}\right),$$

где $\sigma(\cdot)$ обозначает сигмоидальную функцию (например, логистическую функцию), $\Delta S > 0$ – параметр ширины переходной зоны.

При значениях $S(t) < S_{crit}$ доминирует контур стабильности (при этом λ близко к нулю): система использует стандартные процедуры и минимизирует расход буферов. При значениях $S(t) > S_{crit}$ активируется контур адаптации (при этом λ близко к единице): система переходит в режим активной трансформации, интенсивно расходуя буферы для поиска новых конфигураций.

Математически это соответствует бифуркации седло-узел в расширенном фазовом пространстве, описываемом переменными S, B и λ , что объясняет возможность резких переходов между режимами функционирования при плавном изменении внешних условий (Strogatz, 2015).

Предложенная концепция адаптивной бизнес-модели согласуется с теорией динамических способностей (Teese et al., 1997; Teese, 2007), рассматривающей способность организации к sensing (восприятию возможностей и угроз), seizing (захвату возможностей) и transforming (трансформации) как ключевой фактор конкурентоспособности в динамичной среде.

4.2. Каузальная диаграмма адаптивной бизнес-модели

На основе концептуальной рамки, изложенной в разделе 4.1, построена CLD адаптивной бизнес-модели многокомпонентной среды (рис. 3).

Контур стабильности R1 (балансирующая петля) обеспечивает поддержание операционной стабильности системы. При увеличении уровня стресса активируется оперативная корректировка, которая через механизм мобилизации ресурсов повышает операционную стабильность.

Контур адаптации R2 (усиливающая петля) активируется при превышении критического порога стресса S_{crit} . Через узел парадоксального управления $u_{paradox}$ система переключается в режим активной трансформации: запускаются процессы НИОКР и реконфигурации, формируются новые способности, которые через механизм буферизации пополняют вектор буферов

$B(t)$. Усиленные буферы повышают мощность адаптации $\alpha(S, B)$, что позволяет системе справляться с возмущениями большей интенсивности.

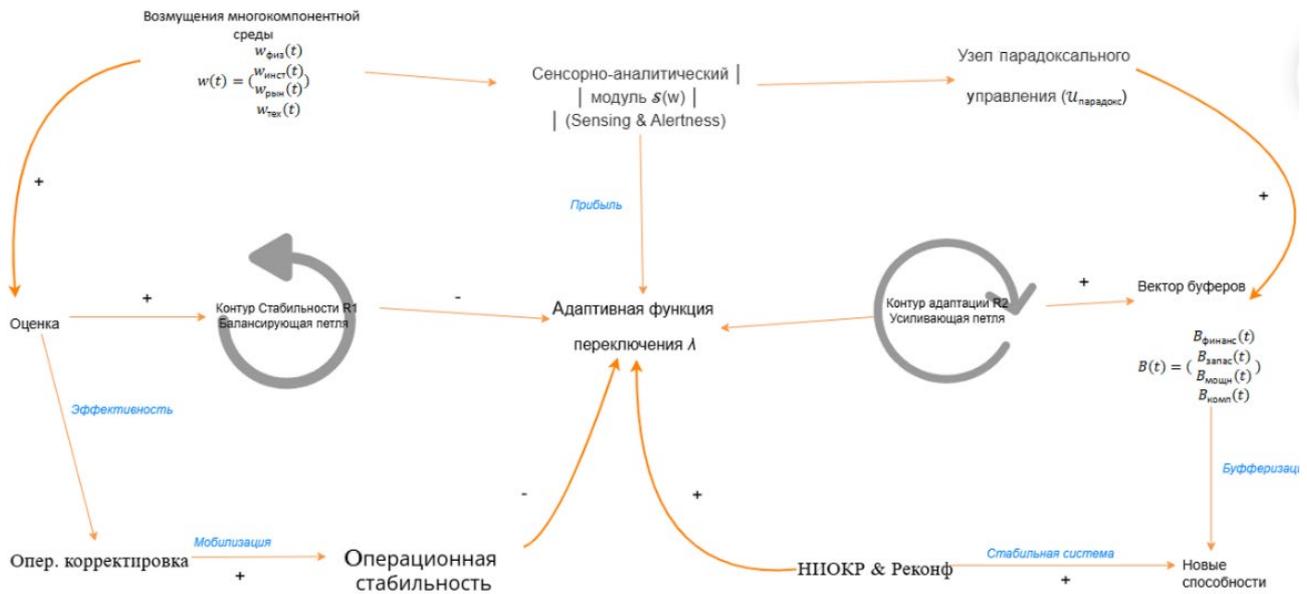


Рисунок 3. Причинно-следственная диаграмма адаптивной бизнес-модели многокомпонентной среды

Центральным элементом диаграммы является узел парадоксального управления $u_{paradox}$, осуществляющий взвешенное переключение между контурами R1 и R2 посредством адаптивной функции $\lambda(t)$. Данный механизм реализует концепцию «тройной парадоксальной конфигурации» (Ricciardi et al., 2016), обеспечивая динамический баланс между стабильностью и адаптивностью.

Вектор возмущений многокомпонентной среды $w(t)$ поступает на вход сенсорно-аналитического модуля $s(w)$, который формирует интегральную оценку внешних воздействий и передает ее в узел парадоксального управления. Модуль реализует функцию sensing в терминах теории динамических способностей (Теесе, 2007).

Правая часть диаграммы отображает динамику вектора буферов $B(t)$, включающего финансовые резервы $B_{финанс}(t)$, материальные запасы $B_{запас}(t)$, резервные мощности $B_{мощн}(t)$ и компетентностный буфер $B_{комп}(t)$. Процесс буферизации обеспечивает накопление ресурсов в периоды стабильного функционирования для их последующего использования при адаптации к возмущениям.

4.3. Диаграмма потоков и запасов адаптивной бизнес-модели

На основе причинно-следственной диаграммы (рис. 3) построена SFD в среде имитационного моделирования VENSIM (рис. 4).

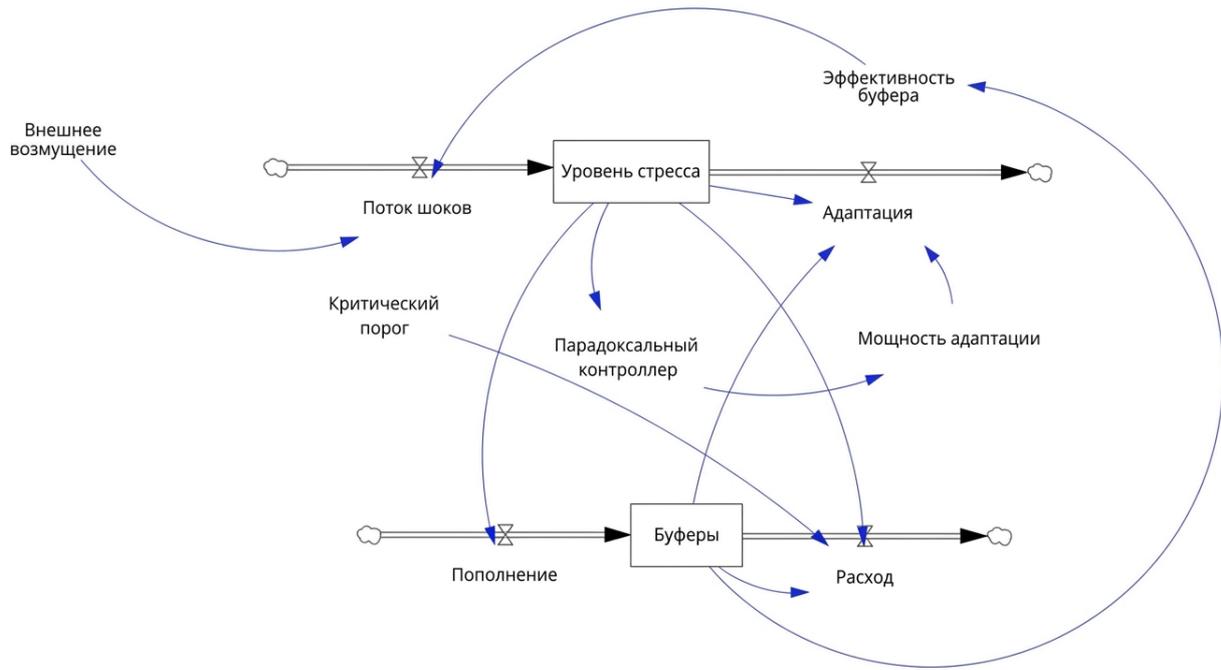


Рисунок 4. Диаграмма потоков и запасов адаптивной бизнес-модели многокомпонентной среды

Модель содержит два ключевых запаса (stocks), которые являются интегралами соответствующих потоков (flows) во времени. Первый запас представляет уровень стресса $S(t)$, который накапливает воздействие внешних возмущений и характеризует степень напряженности системы в каждый момент времени. Второй запас представляет буферы $B(t)$, то есть агрегированный запас организационных ресурсов различной природы, обеспечивающий способность системы абсорбировать внешние шоки без немедленной деградации ее основных функций.

Динамика запасов описывается двумя дифференциальными уравнениями. Для уровня стресса уравнение имеет вид:

$$\frac{dS}{dt} = \phi_{shock}(w(t)) - \alpha(S, B) \cdot S(t),$$

где первый член в правой части, обозначаемый как поток шок, представляет входящий поток, формируемый внешними возмущениями многокомпонентной среды, а второй член представляет исходящий поток адаптации, определяемый мощностью адаптации $\alpha(S, B)$ и текущим уровнем стресса. Для буферов уравнение имеет вид:

$$\frac{dB}{dt} = \rho(S, B, \pi) - \delta(S, B, w) \cdot B(t),$$

где функция пополнения $\rho(S, B, \pi)$ зависит от уровня стресса, текущего состояния буферов и прибыльности системы π , а функция расхода $\delta(S, B, w) \cdot B(t)$ возрастает при интенсивных внешних возмущениях и высоком уровне стресса.

4.4. Численное моделирование и результаты

Верификация предложенной модели выполнена методом имитационного моделирования в среде VENSIM на основе диаграммы потоков и запасов, представленной на рис. 2. Моделирование позволяет проследить совместную динамику уровня стресса $S(t)$ и буферов $B(t)$ при различных сценариях внешних возмущений $w(t)$ и проверить, согласуется ли поведение системы с качественными выводами ISS-анализа.

Для базового сценария (рис. 5) интенсивность внешних возмущений считается ограниченной и стационарной по порядку величины. Начальные условия выбираются в окрестности равновесной точки ($S(0) \approx S^*, B(0) \approx B^*$). В этом случае траектории $S(t)$ и $B(t)$ демонстрируют затухающие колебания: уровень стресса сначала возрастает под действием потока шоков, затем постепенно снижается за счет адаптации, а буферы после небольшого проседания возвращаются к устойчивому значению. Поведение системы остается ограниченным, а влияние начальных условий исчезает, что соответствует ISS-свойству при малых возмущениях.

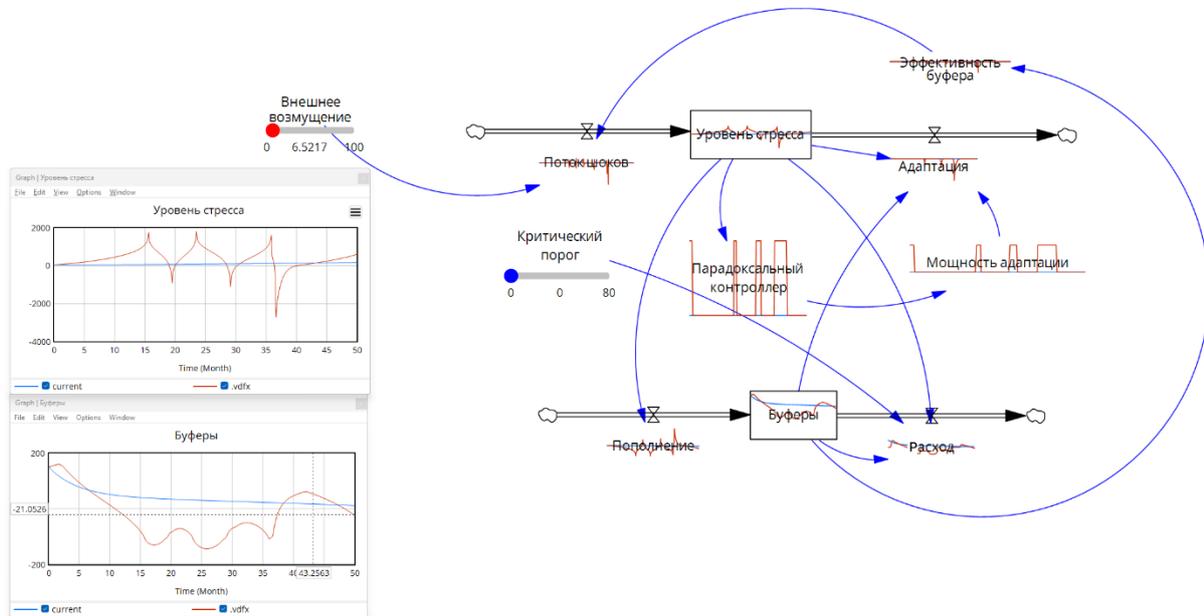


Рисунок 5. Тест 1

Во втором сценарии (рис. 6) моделируется серия кратковременных, но более мощных шоков, которые периодически выводят уровень стресса выше критического порога S_{crit} . В эти моменты активируется парадоксальный контроллер: функция переключения $\lambda(t)$ быстро приближается к единице, система переходит в режим адаптации, и начинается интенсивный расход буферов на поддержание работоспособности. Графики показывают характерные «ступеньки» в динамике $B(t)$: при каждом крупном шоке буферы заметно снижаются, но затем, по мере возвращения стресса к допустимому уровню, снова пополняются за счет потока $\rho(S, B, \pi)$. При этом, несмотря на локальные всплески стресса, траектории не выходят за пределы разумных границ, что подтверждает устойчивость модели к повторяющимся возмущениям.

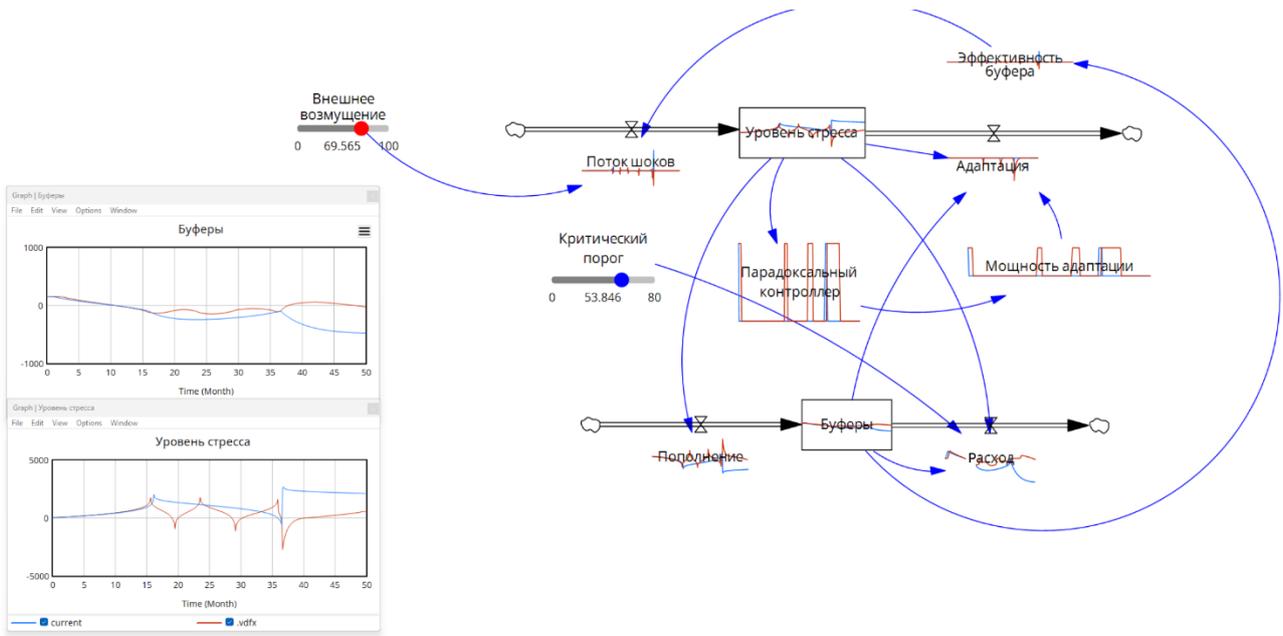


Рисунок 6. Тест 2

В третьем сценарии (рис. 7) рассматривается предельная ситуация, когда интенсивность внешних возмущений близка к верхней границе допустимого диапазона, а начальный уровень буферов $B(0)$ относительно низок. В этом режиме система большую часть времени проводит в зоне $S(t) > S_{crit}$, то есть в режиме адаптации. Моделирование показывает, что при недостаточном уровне буферов траектория $B(t)$ может приблизиться к нулю, после чего способность к адаптации резко падает, а стресс закрепляется на высоком уровне. Такой сценарий соответствует выходу за область притяжения равновесия и иллюстрирует важность поддержания минимально достаточного уровня буферов для сохранения устойчивости.

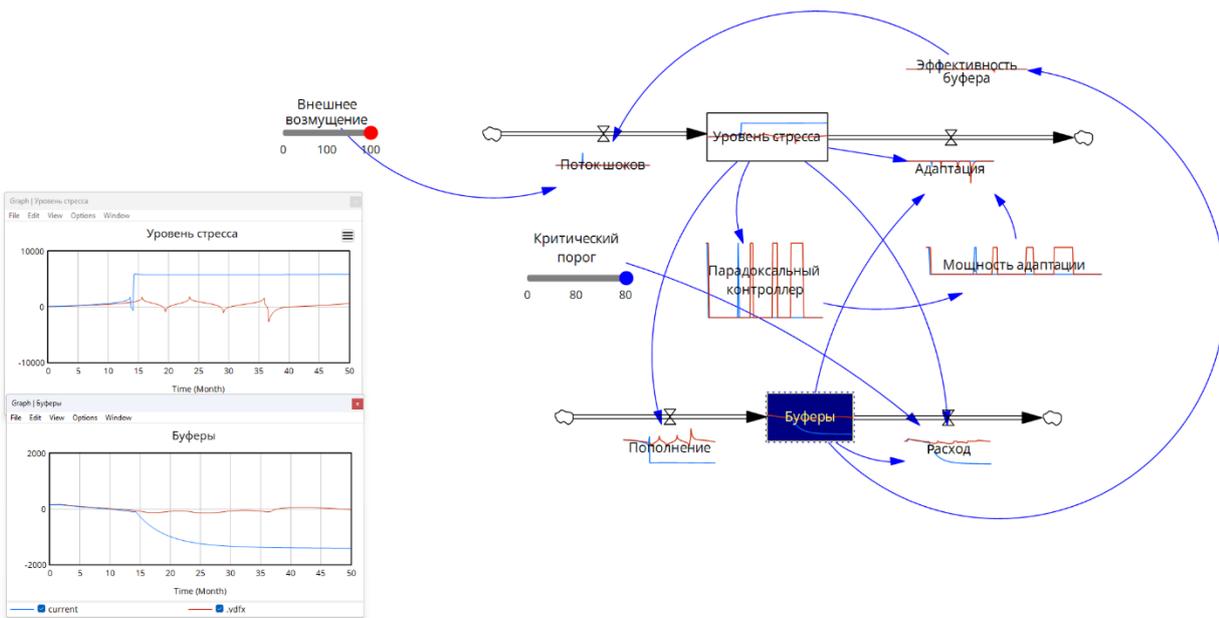


Рисунок 7. Тест 3

Сравнение сценариев демонстрирует, что при умеренных и повторяющихся шоках с сохранением буферов выше критического уровня система проявляет устойчивое поведение: стресс возвращается к допустимым значениям, а буферы успевают восстановиться. При экстремальных шоках и одновременном истощении буферов система утрачивает способность к самовосстановлению, что согласуется с выводами теоретического анализа о конечности области притяжения. Таким образом, численные эксперименты подтверждают два ключевых результата: во-первых, наличие ISS-устойчивости при ограниченных возмущениях и достаточном объеме буферов, во-вторых, критическую роль параметров адаптационного контура и начального уровня ресурсов для долгосрочной устойчивости адаптивной бизнес-модели.

4.5. Условия устойчивости адаптивной бизнес-модели

На основе построенной модели и результатов численного моделирования выявлены ключевые компоненты, определяющие устойчивость адаптивной бизнес-модели многокомпонентной среды. К ним относятся: вектор внешних возмущений $w(t)$, критический порог стресса S_{crit} , уровень буферов $B(t)$ и мощность адаптации $\alpha(S, B)$. Взаимосвязь этих компонент определяет, сохранит ли система способность возвращаться к равновесию после воздействия шоков.

Для формального доказательства устойчивости применяется метод функций Ляпунова в рамках ISS-концепции (Sontag, 2008). Строится квадратичная функция Ляпунова вида:

$$V(S, B) = \frac{1}{2} a_1 (S - S^*)^2 + \frac{1}{2} a_2 (B - B^*)^2,$$

где S^* и B^* – равновесные значения стресса и буферов. Данная функция положительно определена и радиально неограничена, то есть растет без предела при удалении от равновесия (Khalil, 2002).

Вычисление производной dV/dt вдоль траекторий системы показывает, что при выполнении трех условий производная отрицательна (Теесе, 2007; Gimranov et al., 2023):

Условие 1 (ограниченность возмущений). Функция потока шоков $\phi_{shock}(w(t))$ ограничена сверху: существует константа $L > 0$ такая, что $|\phi_{shock}(w(t))| \leq L \|w\|$. Это означает, что внешняя среда не порождает бесконечно больших шоков.

Условие 2 (эффективность буферов). Мощность адаптации возрастает с ростом буферов: $d\alpha/dB > 0$. Чем больше ресурсов накоплено, тем быстрее система снижает стресс.

Условие 3 (восполнение буферов). При $S < S_{crit}$ функция пополнения $\rho(S, B, \pi)$ положительна. Система накапливает ресурсы в периоды стабильности (Serman, 2000).

При выполнении этих условий справедливо неравенство:

$$\frac{dV}{dt} \leq -c \cdot V(S, B) + \gamma \cdot \|w\|^2,$$

где $c > 0$ – коэффициент диссипации, $\gamma > 0$ – константа (Mironchenko & Prieur, 2020). Отсюда по теореме Сонтага следует ISS-устойчивость системы: при ограниченных возмущениях состояние $(S(t), B(t))$ остается ограниченным, а влияние начальных условий со временем исчезает.

В рамках данной работы адаптивность бизнес-модели цифрового предприятия в многокомпонентной среде определяется как способность системы динамически переключаться

между режимом стабильности (оптимизация текущих операций при $S < S_{crit}$) и режимом адаптации (трансформация бизнес-модели при $S > S_{crit}$) в зависимости от уровня внешнего стресса, обеспечивая устойчивость траектории при ограниченных возмущениях. В отличие от традиционных трактовок адаптивности как постоянной готовности к изменениям (Teese et al., 1997; Teese, 2007) или балансировки противоречий (Smith & Lewis, 2011), предлагаемое определение формализует адаптивность через управляемое переключение между взаимоисключающими режимами с явным пороговым критерием.

Таким образом, устойчивость адаптивной бизнес-модели обеспечивается совместным действием трех механизмов: ограниченностью внешних шоков, наличием буферов с положительной эффективностью и способностью системы накапливать ресурсы в периоды низкого стресса. Критический порог S_{crit} играет роль переключателя между режимами парадоксального управления (Smith & Lewis, 2011), но сам по себе не нарушает устойчивость при выполнении указанных условий. Полученные результаты подтверждены численным моделированием в среде VENSIM (раздел 4.4) и согласуются с качественными выводами теории организационного динамизма (Ricciardi et al., 2016).

5. Обсуждение

Разработана двухуровневая математическая модель, в которой базовый уровень описывает динамику пользовательской базы, финансовых резервов, инфраструктуры и партнерской экосистемы, а расширенный уровень учитывает многокомпонентную среду через вектор возмущений, агрегированный уровень стресса и вектор буферов. Нелинейная функция воздействия отражает синергетическое взаимодействие физических, институциональных, рыночных и технологических факторов, что позволяет перейти от изолированного анализа отдельных компонент к исследованию их совместного эффекта. Работы по цифровым экосистемам (Tsai et al., 2022; Evans & Schmalensee, 2016) и устойчивым бизнес-моделям (Lambert et al., 2019; Brenner & Guerrero et al., 2018) используют преимущественно агентное моделирование и концептуальные схемы без математических условий устойчивости. Настоящая работа формализует многокомпонентность через вектор возмущений с синергетическим взаимодействием, дополняя существующие подходы математическим аппаратом.

Механизм парадоксального управления реализует переключение между контуром стабильности и контуром адаптации при превышении критического порога стресса. Противоречие между эксплуатацией существующих возможностей и поиском новых решений разрешается не через постоянный компромисс, а через управляемое переключение в зависимости от состояния системы. Концепция парадоксального управления (Ricciardi et al., 2016; Smith & Lewis, 2011) и организационной двойственности (O'Reilly & Tushman, 2013) описывает необходимость балансировки противоречий, однако не формализует критерий и момент переключения. Предложенная модель уточняет эти концепции через математически определенный критерий на основе уровня стресса, что делает механизм операционализируемым.

На этой основе уточняется понимание адаптивности применительно к многокомпонентной среде. Адаптивность выступает не как абстрактная способность к изменениям, а как количественно описываемая способность управлять переходами между режимами на основе объективного критерия стресса и состояния буферов. В многокомпонентной среде ключевой становится способность буферов поглощать синергетическое воздействие разнотипных факторов и восстанавливаться в стабильные периоды. Теория динамических способностей (Teese

et al., 1997; Teece, 2007) определяет адаптивность через процессы sensing, seizing и transforming, но не связывает их с ресурсными характеристиками и моментами активации. Концепция организационной устойчивости (Lengnick-Hall et al., 2011) не различает возврат к прежней конфигурации от перехода к новой. Предложенное уточнение формализует адаптивность через управляемое переключение с учетом буферов и синергетических возмущений, переводя дискуссию в плоскость количественного анализа.

Формальное доказательство устойчивости в ISS-терминах показывает, что при ограниченности функции воздействия, положительной чувствительности адаптации к буферам и положительности восполнения ресурсов траектория стресса и буферов остается ограниченной при ограниченных возмущениях. Эти три условия образуют неделимую систему: нарушение любого приводит к неустойчивости даже при значительных запасах ресурсов. Теория активных систем (Burkov et al., 2012) утверждает принцип системной целостности, но не предоставляет формального доказательства. Системная динамика (Forrester, 1961; Sterman, 2000) показала роль обратных связей и запасов, ограничиваясь численным моделированием. ISS-концепция развита для технических систем (Sontag, 2008; Khalil, 2002), но не применялась к организациям. Настоящая работа адаптирует ISS-метод для анализа организационной устойчивости, дополняя численное моделирование формальным доказательством.

6. Заключение

В данной работе разработана математическая модель адаптивной бизнес-модели цифрового предприятия, интегрирующая теорию активных систем и системную динамику. Модель состоит из базового уровня, описывающего четыре переменные состояния (пользовательская база $U(t)$, финансовые резервы $F(t)$, качество инфраструктуры $Q(t)$, партнерская экосистема $P(t)$), и расширенного уровня, учитывающего многокомпонентную среду через вектор возмущений $w(t)$ и агрегированные переменные $S(t)$ (уровень стресса) и $B(t)$ (вектор буферов).

Формализован механизм парадоксального управления, реализующий переключение между режимом стабильности (контур R1, ориентированный на оптимизацию текущих операций) и режимом адаптации (контур R2, ориентированный на трансформацию бизнес-модели) через критический порог стресса S_{crit} . Доказаны условия устойчивости ISS-методом: система устойчива при выполнении трех необходимых и достаточных условий ограниченность функции потока возмущений, положительная чувствительность мощности адаптации к буферам и положительность функции восполнения буферов в периоды стабильности. Численная верификация в среде VENSIM на трех сценариях подтвердила теоретические предсказания и продемонстрировала наличие области притяжения равновесного состояния.

Модель может быть применена для раннего обнаружения угроз устойчивости, поддержки инвестиционных решений и разработки стратегий цифровых платформ. Важно отметить, что устойчивость, доказанная в работе, носит локальный характер и она гарантируется при условии, что система находится в определенной области фазового пространства и возмущения остаются в пределах ограниченности. При выходе за пределы этой области или при катастрофических возмущениях условия ISS-устойчивости могут нарушиться. Кроме того, модель не учитывает стохастическую природу возмущений, агрегирует многомерные буферы в одномерный вектор, что теряет специфику различных типов ресурсов и их взаимозаменяемости.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются, во-первых, расширение модели на случай многомерных буферов с явным учетом различной динамики их мобилизации и взаимозаменяемости, во-вторых, анализ поведения системы под влиянием стохастических и экстремальных возмущений с применением теории критических переходов. Особый интерес представляет применение теории пучков для формализации согласованности локальных состояний различных компонент среды и их агрегирования в глобальное воздействие на предприятие, что позволит строго описать синергетические эффекты между физическими, институциональными, рыночными и технологическими факторами. Кроме того, важной задачей является эмпирическая верификация модели на данных реальных цифровых предприятий различных отраслей для оценки параметров и проверки предсказательной способности.

Список литературы

- Alqahtani, F., Akhtar, A., Araban, S., 2020. Digital transformation and organizational agility: a systematic literature review. *Journal of Decision Systems* 29 (4), 317–336.
- Armstrong, M., 2006. Competition in two-sided markets. *The RAND Journal of Economics* 37 (3), 668–691. <https://doi.org/10.1111/j.1756-2171.2006.tb00037.x>
- Barreteau, O., Bousquet, F., Attonaty, J.M., 2001. Role-playing games for opening space to negotiation in natural resource management. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4 (2).
- Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G., 1999. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, New York, Oxford.
- Brenner, B., Guerrero, M., 2018. Transformative Sustainable Business Models in the Light of the Digital Imperative – A Global Business Economics Perspective. *Sustainability* 10 (12), 4428. <https://doi.org/10.3390/su10124428>
- Burkov V.N., Korgin N.A., Novikov D.A., 2012. *Theory of active systems: an introduction*. Librocom, Moscow
- Colombi, C., Marengi, M.D., Gazzola, P., 2023. Fashion Digital Transformation: Innovating Business Models toward Circular Economy and Sustainability. *Sustainability* 15 (6), 4942. <https://doi.org/10.3390/su15064942>
- Evans, D.S., Schmalensee, R., 2016. *Matchmakers: The New Economics of Multisided Platforms*. Harvard Business Review Press, Boston.
- Forrester, J.W., 1961. *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Rodionov, D.G., Konnikov, E.A., Konnikova, O.A., 2018. Approaches to Ensuring the Sustainability of Industrial Enterprises of Different Technological Levels. *The Journal of Social Sciences Research (Special Issue 3)*, 277–282. <https://doi.org/10.32861/jssr.spi3.277.282>
- Granovetter, M., 1978. Threshold models of collective behavior. *American Journal of Sociology* 83 (6), 1420–1443. <https://doi.org/10.1086/226707>
- Hussain, H., De Vries, M., 2024. System dynamics applied in enterprise engineering: A systematic literature review. *Journal of Modelling in Management* 20 (1), 1–29. <https://doi.org/10.1108/JM2-05-2023-0082>
- Irajifar, L., Chen, H., Lak, A., Sharifi, A., Cheshmehzangi, A., 2023. The nexus between digitalization and sustainability: A scientometrics analysis. *Heliyon* 9 (5), e15172. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15172>
- Johnson, N.L., Kotz, S., Balakrishnan, N., 1994. *Continuous Univariate Distributions 1*. Wiley, New York.
- Khalil, H.K., 2002. *Nonlinear Systems*, 3rd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Lambert, S., Davidson, R., 2019. Capturing Dynamics in Business Model Frameworks. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 5 (1), 8. <https://doi.org/10.3390/joitmc5010008>
- Lengnick-Hall, C.A., Beck, T.E., Lengnick-Hall, M.L., 2011. Developing a capacity for organizational resilience through strategic human resource management. *Human Resource Management Review* 21 (3), 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2010.07.001>
- Macal, C.M., North, M.J., 2010. Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation* 4 (3), 151–162. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>
- Metcalf, R.M., 1995. Metcalfe's law: A network becomes more valuable as it reaches more users. *Infoworld* 17 (40), 53–54.
- Mironchenko, A., Prieur, C., 2020. Input-to-State Stability of Infinite-Dimensional Systems: Recent Results and Open Questions. *SIAM Review* 62 (3), 529–614. <https://doi.org/10.1137/19M1291248>
- O'Reilly, C.A., Tushman, M.L., 2013. Organizational Ambidexterity: Past, Present, and Future. *Academy of Management Perspectives* 27 (4), 324–338. <https://doi.org/10.5465/amp.2013.0025>
- Østergaard, P.A., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H., Kalogirou, S., 2020. Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable Energy* 146, 2430–2437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>
- Pasqualino, R., Demartini, M., Bagheri, F., 2021. Digital Transformation and Sustainable Oriented Innovation: A System Transition Model for Socio-Economic Scenario Analysis. *Sustainability* 13 (21), 11564. <https://doi.org/10.3390/su132111564>
- Ricciardi, F., Zardini, A., Rossignoli, C., 2016. Organizational dynamism and adaptive business model innovation: The triple paradox configuration. *Journal of Business Research* 69 (11), 5487–5493. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.04.154>
- Rochet, J.C., Tirole, J., 2003. Platform Competition in Two-Sided Markets. *Journal of the European Economic Association* 1 (4), 990–1029. <https://doi.org/10.1162/154247603322493212>
- Rogers, E.M., 2003. *Diffusion of Innovations*, 5th ed. Free Press, New York.
- Schoenenberger, L., Schmid, A., Tanase, R., Beck, M., Schwaninger, M., 2021. Structural Analysis of System Dynamics Models. *Simulation Modelling Practice and Theory* 110, 102333. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102333>
- Senge, P.M., 1990. *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*. Doubleday/Currency, New York.

- Smith, W.K., Lewis, M.W., 2011. Toward a Theory of Paradox: A Dynamic equilibrium Model of Organizing. *Academy of Management Review* 36 (2), 381–403. <https://doi.org/10.5465/amr.2009.0223>
- Sontag, E.D., 2008. Input to State Stability: Basic Concepts and Results, in: Nistri, P., Stefani, G. (eds.) *Nonlinear and Optimal Control Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 163–220. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77653-6_3
- Speich, M., Ulli-Beer, S., 2021. Combining Business Model Innovation and Model-Based Analysis to Tackle the Deep Uncertainty of Societal Transitions – A Case Study on Industrial Electrification and Power Grid Management. *Sustainability*, 13 (13), 7264. <https://doi.org/10.3390/su13137264>
- Sterman, J.D., 2000. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill, Boston.
- Strogatz, S.H., 2015. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9780429492563>
- Teece, D.J., 2007. Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal* 28 (13), 1319–1350. <https://doi.org/10.1002/smj.640>
- Teece, D.J., Pisano, G., Shuen, A., 1997. Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal* 18 (7), 509–533. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z)
- Tolstykh, T., Gamidullaeva, L., Shmeleva, N., 2020. Elaboration of a Mechanism for Sustainable Enterprise Development in Innovation Ecosystems. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 6 (4), 95. <https://doi.org/10.3390/joitmc6040095>
- Tsai, C.H., Zdravkovic, J., Stima, J., 2022. Modeling Digital Business Ecosystems: A Systematic Literature Review. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly (CSIMQ)* 30, 1–30 <https://doi.org/10.7250/csimq.2022-30.01>
- Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Теория активных систем: введение. М.: Либроком, 2012.
- Гимранов Р.Д., Лугачёв М.И., Тамбовцев В.Л. Динамические способности управленческих единиц в крупной компании // *Journal of Economic Regulation*. 2023. Т. 14. № 4. С. 31–47. <https://doi.org/10.17835/2078-5429.2023.14.4.031-047>
- Новиков Д.А. Кибернетика: навигатор. М.: ЛЕНАНД, 2016.

References

- Alqahtani, F., Akhtar, A., Araban, S., 2020. Digital transformation and organizational agility: a systematic literature review. *Journal of Decision Systems* 29 (4), 317–336.
- Armstrong, M., 2006. Competition in two-sided markets. *The RAND Journal of Economics* 37 (3), 668–691. <https://doi.org/10.1111/j.1756-2171.2006.tb00037.x>
- Barreteau, O., Bousquet, F., Attonaty, J.M., 2001. Role-playing games for opening space to negotiation in natural resource management. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4 (2).
- Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G., 1999. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, New York, Oxford.
- Brenner, B., Guerrero, M., 2018. Transformative Sustainable Business Models in the Light of the Digital Imperative – A Global Business Economics Perspective. *Sustainability* 10 (12), 4428. <https://doi.org/10.3390/su10124428>
- Burkov V.N., Korgin N.A., Novikov D.A., 2012. *Theory of active systems: an introduction*. Librocom, Moscow.
- Colombi, C., Marengi, M.D., Gazzola, P., 2023. Fashion Digital Transformation: Innovating Business Models toward Circular Economy and Sustainability. *Sustainability* 15 (6), 4942. <https://doi.org/10.3390/su15064942>
- Evans, D.S., Schmalensee, R., 2016. *Matchmakers: The New Economics of Multisided Platforms*. Harvard Business Review Press, Boston.
- Forrester, J.W., 1961. *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Gimranov R.D., Lugachev M.I., Tambovtsev V.L., 2023. Dynamic Abilities of Management Units in a Large Company. *Journal of Economic Regulation* 14 (4), 31–47. <https://doi.org/10.17835/2078-5429.2023.14.4.031-047>
- Granovetter, M., 1978. Threshold models of collective behavior. *American Journal of Sociology* 83 (6), 1420–1443. <https://doi.org/10.1086/226707>
- Hussain, H., De Vries, M., 2024. System dynamics applied in enterprise engineering: A systematic literature review. *Journal of Modelling in Management* 20 (1), 1–29. <https://doi.org/10.1108/JM2-05-2023-0082>
- Irajifar, L., Chen, H., Lak, A., Sharifi, A., Cheshmehzangi, A., 2023. The nexus between digitalization and sustainability: A scientometrics analysis. *Heliyon* 9 (5), e15172. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15172>
- Johnson, N.L., Kotz, S., Balakrishnan, N., 1994. *Continuous Univariate Distributions 1*. Wiley, New York.
- Khalil, H.K., 2002. *Nonlinear Systems*, 3rd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Lambert, S., Davidson, R., 2019. Capturing Dynamics in Business Model Frameworks. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 5 (1), 8. <https://doi.org/10.3390/joitmc5010008>
- Lengnick-Hall, C.A., Beck, T.E., Lengnick-Hall, M.L., 2011. Developing a capacity for organizational resilience through strategic human resource management. *Human Resource Management Review* 21 (3), 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2010.07.001>
- Macal, C.M., North, M.J., 2010. Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation* 4 (3), 151–162. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>
- Metcalf, R.M., 1995. Metcalfe's law: A network becomes more valuable as it reaches more users. *Infoworld* 17 (40), 53–54.
- Mironchenko, A., Prieur, C., 2020. Input-to-State Stability of Infinite-Dimensional Systems: Recent Results and Open Questions. *SIAM Review* 62 (3), 529–614. <https://doi.org/10.1137/19M1291248>
- Novikov D.A., 2016. *Кибернетика: навигатор [Cybernetics: navigator]*. LENAND, Moscow.
- O'Reilly, C.A., Tushman, M.L., 2013. Organizational Ambidexterity: Past, Present, and Future. *Academy of Management Perspectives* 27 (4), 324–338. <https://doi.org/10.5465/amp.2013.0025>
- Østergaard, P.A., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H., Kalogirou, S., 2020. Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable Energy* 146, 2430–2437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>
- Pasqualino, R., Demartini, M., Bagheri, F., 2021. Digital Transformation and Sustainable Oriented Innovation: A System Transition Model for Socio-Economic Scenario Analysis. *Sustainability* 13 (21), 11564. <https://doi.org/10.3390/su132111564>
- Ricciardi, F., Zardini, A., Rossignoli, C., 2016. Organizational dynamism and adaptive business model innovation: The triple paradox configuration. *Journal of Business Research* 69 (11), 5487–5493. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.04.154>

- Rochet, J.C., Tirole, J. (2003). Platform competition in two-sided markets. *Journal of the European Economic Association*, 1(4), 990-1029. <https://doi.org/10.1162/154247603322493212>
- Rogers, E.M., 2003. *Diffusion of Innovations*, 5th ed. Free Press, New York.
- Schoenenberger, L., Schmid, A., Tanase, R., Beck, M., Schwaninger, M., 2021. Structural Analysis of System Dynamics Models. *Simulation Modelling Practice and Theory* 110, 102333. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102333>
- Senge, P.M., 1990. *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*. Doubleday/Currency, New York.
- Smith, W.K., Lewis, M.W., 2011. Toward a Theory of Paradox: A Dynamic equilibrium Model of Organizing. *Academy of Management Review* 36 (2), 381–403. <https://doi.org/10.5465/amr.2009.0223>
- Sontag, E.D., 2008. Input to State Stability: Basic Concepts and Results, in: Nistri, P., Stefani, G. (eds.) *Nonlinear and Optimal Control Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77653-6_3
- Speich, M., Ulli-Beer, S., 2021. Combining Business Model Innovation and Model-Based Analysis to Tackle the Deep Uncertainty of Societal Transitions – A Case Study on Industrial Electrification and Power Grid Management. *Sustainability*, 13 (13), 7264. <https://doi.org/10.3390/su13137264>
- Sterman, J.D., 2000. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill, Boston.
- Strogatz, S.H., 2015. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9780429492563>
- Teece, D.J., Pisano, G., Shuen, A., 1997. Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal* 18 (7), 509–533. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z)
- Teece, D.J., 2007. Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal* 28 (13), 1319–1350. <https://doi.org/10.1002/smj.640>
- Tolstykh, T., Gamidullaeva, L., Shmeleva, N., 2020. Elaboration of a Mechanism for Sustainable Enterprise Development in Innovation Ecosystems. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 6 (4), 95. <https://doi.org/10.3390/joitmc6040095>
- Tsai, C.H., Zdravkovic, J., Stima, J., 2022. Modeling Digital Business Ecosystems: A Systematic Literature Review. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly (CSIMQ)* 30, 1–30 <https://doi.org/10.7250/csimq.2022-30.01>

Статья поступила в редакцию 30.09.2025, одобрена после рецензирования 15.11.2025, принята к публикации 30.11.2025.

The article was submitted 30.09.2025, approved after reviewing 15.11.2025, accepted for publication 30.11.2025.

Информация об авторах:

1. Даниленко Кирилл, аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация. <https://orcid.org/0009-0001-7753-193X>, danilenko@kirill-viktorovich.ru
2. Ирина Брусакова, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0003-2832-7833>, brusakovai@mail.ru

About the authors:

1. Danilenko Kirill, graduate student, St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint-Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0009-0001-7753-193X>, danilenko@kirill-viktorovich.ru
3. Irina Brusakova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-2832-7833>, brusakovai@mail.ru