

# ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

2025  
Т.25, № 2

ISSN 1991-976X (Print)  
ISSN 2409-6571 (Online)

СЕРИЯ

## «КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Журнал освещает новые научные достижения и практические разработки ученых по актуальным проблемам компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники.

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного управления предприятиями в промышленности
- Системы управления летательными аппаратами

### Редакционная коллегия:

**Логиновский О.В.**, д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (*гл. редактор*) (г. Челябинск);  
**Бурков В.Н.**, д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (*зам. гл. редактора*) (г. Москва);  
**Голлай А.В.**, д.т.н., доц. (*зам. гл. редактора*) (г. Челябинск);  
**Захаров В.В.**, *отв. секретарь* (г. Челябинск);  
**Баркалов С.А.**, д.т.н., проф. (г. Воронеж);  
**Березанский Л.**, PhD, проф. (г. Беэр-Шева, Израиль);  
**Джапаров Б.А.**, д.т.н., проф. (г. Астана, Казахстан);  
**Затонский А.В.**, д.т.н., проф. (г. Пермь);  
**Мазуров В.Д.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Екатеринбург);  
**Максимов А.А.**, д.т.н. (г. Новокузнецк);  
**Мельников А.В.**, д.т.н., проф. (г. Ханты-Мансийск);  
**Прангишвили А.И.**, д.т.н., проф. (г. Тбилиси, Грузия);  
**Щепкин А.В.**, д.т.н., проф. (г. Москва);  
**Ячиков И.М.**, д.т.н., проф. (г. Магнитогорск)

### Редакционный совет:

**Шестаков А.Л.**, д.т.н., проф. (*председатель*) (г. Челябинск);  
**Авербах И.**, PhD, проф. (г. Торонто, Канада);  
**Браверман Е.**, PhD, проф. (г. Калгари, Канада);  
**Дегтярь В.Г.**, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Миасс, Челябинская обл.);  
**Казаринов Л.С.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Кибалов Е.Б.**, д.э.н., проф. (г. Новосибирск);  
**Новиков Д.А.**, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Москва);  
**Панферов В.И.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Слинько А.**, PhD, проф. (г. Окленд, Новая Зеландия);  
**Столбов В.Ю.**, д.т.н., проф. (г. Пермь);  
**Ухоботов В.И.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Челябинск);  
**Ушаков В.Н.**, д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Екатеринбург);  
**Шестаков И.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Сан-Паулу, Бразилия);  
**Ширяев В.И.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Шнайдер Д.А.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Штессель Ю.**, PhD, проф. (г. Хантсвилл, Алабама, США)



# BULLETIN

OF THE SOUTH URAL  
STATE UNIVERSITY

2025  
Vol. 25, no. 2

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,  
AUTOMATIC CONTROL,  
RADIO ELECTRONICS”

ISSN 1991-976X (Print)  
ISSN 2409-6571 (Online)

---

Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta.  
Seriya “Komp'yuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika”

---

## South Ural State University

The journal covers new scientific achievements and practical developments of scientists on actual problems of computer technologies, control and radio electronics.

The main purpose of the series is information of scientific researches in the following areas:

- Automated control systems in energy saving
- Automated process control
- Antenna technique
- Communication technologies
- Information and measuring equipment
- Navigation devices and systems
- Radio engineering complexes
- Computer-aided management of enterprises in industry
- Control systems of aircrafts

### Editorial Board:

**Loginosvkiy O.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Burkov V.N.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*deputy editor-in-chief*), Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

**Gollai A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof. (*deputy editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Zakharov V.V.**, *executive secretary*, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Barkalov S.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Voronezh State Technical University Voronezh, Russian Federation;

**Berezansky L.**, PhD, Prof., Ben Gurion University of the Negev, Israel;

**Dzhaparov B.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Archive of the President of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan;

**Zatonskiy A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science and Education of the Russian Federation, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;

**Mazurov V.D.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation;

**Maksimov A.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Open Joint Stock Company ‘Kuznetsk Ferroalloys’, Novokuznetsk, Russian Federation;

**Melnikov A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russian Federation;

**Prangishvili A.I.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of National Academy of Sciences of Georgia, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia;

**Shchepkin A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

**Yachikov I.M.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation.

### Editorial Council:

**Shestakov A.L.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*chairman*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Averbakh I.**, PhD, Prof., University of Toronto, Canada;

**Braverman E.**, PhD, Prof., St. Mary's University, Calgary, and Athabasca University, Department of Science, Athabasca, Canada;

**Degtyar' V.G.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation;

**Kazarinov L.S.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Kibalov E.B.**, Dr. of Sci. (Econ.), Prof., Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation;

**Novikov D.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

**Panferov V.I.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Slinko A.**, PhD, Prof., University of Auckland, New Zealand;

**Stolbov V.Yu.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;

**Ukhobotov V.I.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Ushakov V.N.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, N.N. Krasovsky Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation;

**Shestakov I.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., São Paulo University, Brazil;

**Shiryaev V.I.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Schneider D.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

**Shtessel Yu.**, PhD, Prof., Huntsville, Alabama, USA.

## СОДЕРЖАНИЕ

### **Информатика и вычислительная техника**

МЕЛЬНИКОВ А.В., НИКОЛАЕВ И.Е., РУСАНОВ М.А., АББАЗОВ В.Р. Сравнительный анализ методов RAG для построения русскоязычных интеллектуальных сервисов ..... 5

ВОЛОДИНА Ю.И., СЕРГЕЕВ Н.О., ЗАТОНСКИЙ А.В. Исследование возможности моделирования светофорного регулирования сложного перекрестка в среде AnyLogic ..... 19

### **Управление в технических системах**

ТЕЛЕГИН А.И. Выписывание инерционных матриц шарнирных древовидных систем ..... 33

### **Инфокоммуникационные технологии и системы**

ДЕВЯТОВ М.А., УГАРОВ П.А., ТЕЛЕЖКИН В.Ф. Нейросетевая оптимизация областей существования скользящего режима на основе качественного анализа проекций фазового пространства ..... 46

### **Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы**

ШЕСТАКОВ А.Л., НЕКРАСОВ С.Г., ЕРЕМЕЕВА В.А. Обнаружение дефектов ротора асинхронного двигателя по высшим гармоникам тока методом матричных пучков ..... 55

ZAITSEV I.P., KATCAI D.A., RYZHOV S.N. Rotary angle sensor for monitoring the position of actuators ..... 65

### **Управление в социально-экономических системах**

ШИНКАРЕВ А.А., ЛОГИНОВСКИЙ О.В., СТАРОДУБЦЕВ Д.В. Проблематика верификации подлинности, авторского права и целостности цифровых данных ..... 74

БОГДАНОВ А.Д., ЩЕПКИН А.В. Методический подход к управлению организацией общего образования через материальное обеспечение ..... 82

ЛОГИНОВСКИЙ О.В., БЕЛЯКОВА В.А. Модель управления наукоемким производством на основе технологии цифровых двойников ..... 95

БАРКАЛОВ С.А., КУРОЧКА П.Н., СЕРЕБРЯКОВА Е.А. Многокритериальная задача формирования поколений новой техники ..... 107

**От редакционной коллегии** ..... 120

# CONTENTS

## **Informatics and computer engineering**

MELNIKOV A.V., NIKOLAEV I.E., RUSANOV M.A., ABBAZOV V.R. Comparative analysis of RAG methods for building Russian-speaking intelligent services ..... 5

VOLODINA Ju.I., SERGEEV N.O., ZATONSKIY A.V. Study of the possibility of traffic light control modeling of a complex intersection by AnyLogic ..... 19

## **Control in technical systems**

TELEGIN A.I. Writing out inertial matrices of hinged tree-shaped systems ..... 33

## **Infocommunication technologies and systems**

DEVYATOV M.A., UGAROV P.A., TELEZHKIN V.F. Neural network optimization of areas of existence of the sliding mode on the basis of qualitative analysis of phase space projections .... 46

## **Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems**

SHESTAKOV A.L., NEKRASOV S.G., EREMEEVA V.A. Detection of rotor faults in induction motor by higher current harmonics using the matrix pencil method ..... 55

ZAITSEV I.P., KATCAI D.A., RYZHOV S.N. Rotary angle sensor for monitoring the position of actuators ..... 65

## **Control in social and economic systems**

SHINKAREV A.A., LOGINOVSKIY O.V., STARODUBTCEV D.V. Problematics of authenticity verification, copyright and digital data integrity ..... 74

BOGDANOV A.D., TSCHEPKIN A.V. A methodological approach to the management of general education institutions through material resource provision ..... 82

LOGINOVSKIY O.V., BELIAKOVA V.A. Digital twin-based management model for high-tech production ..... 95

BARKALOV S.A., KUROCHKA P.N., SEREBRYAKOVA E.A. Multicriteria task of forming generations of new technology ..... 107

**From the editorial board** ..... 120

# Информатика и вычислительная техника

## Informatics and computer engineering

Научная статья  
УДК 004.89  
DOI: 10.14529/ctcr250201

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ RAG ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ РУССКОЯЗЫЧНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕРВИСОВ

**А.В. Мельников**<sup>1</sup>, [MelnikovAV@uriit.ru](mailto:MelnikovAV@uriit.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1073-7108>  
**И.Е. Николаев**<sup>2</sup>, [ivan\\_nikolaev@csu.ru](mailto:ivan_nikolaev@csu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9686-2435>  
**М.А. Русанов**<sup>3</sup>, [RusanovMA@uriit.ru](mailto:RusanovMA@uriit.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9926-4609>  
**В.Р. Аббазов**<sup>1</sup>, [AbbazovVR@uriit.ru](mailto:AbbazovVR@uriit.ru), <https://orcid.org/0009-0008-9315-2041>

<sup>1</sup> Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия

<sup>2</sup> Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>3</sup> Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается один из наиболее популярных в настоящее время подходов к построению различных типов интеллектуальных помощников и запрос-ответных систем на базе больших языковых моделей (LLM), основанный на in-context learning или retrieval augmented generation (RAG). Появившееся в последнее время множество публикаций на эту тему в первую очередь ориентировано на английский язык и использует такие ведущие по качеству модели, как GPT-4o и их развитие. В то же время оценки методов поиска контекста RAG для задач на русском языке практически отсутствуют, что делает актуальной задачу проведения исследований, направленных на адаптацию и оценку этих методов для русского языка. **Цель исследования:** изучить эффективность различных подходов retrieval augmented generation (RAG) для русскоязычных задач, учитывая, что большинство исследований в этой области ориентированы на английский язык и используют ведущие модели, такие как GPT-4. **Материалы и методы.** В статье рассматриваются три базовых подхода к построению RAG: naïve RAG, HyDE и вероятностный подход, основанный на функции BM25. Особое внимание уделяется оценке качества этих методов по метрике mean average precision (mAP) для трех областей знаний. Комбинированные методы RAG, такие как SelfRAG, не использовались, чтобы получить отдельные оценки каждого подхода. Для экспериментов были отобраны корпуса текстов на русском языке для областей знаний – нефтегазовой промышленности и юриспруденции. **Результаты.** Проведенное исследование позволило получить оценки качества для каждого из рассмотренных методов. Результаты хорошо согласуются с данными других исследований, но уступают известным RAG на английском языке. **Заключение.** Полученные результаты могут быть использованы как базовые оценки (baseline) и в качестве основы для принятия решений по выбору оптимальных архитектур RAG для русскоязычных задач. Дальнейшие исследования будут направлены на интеграцию комбинированных методов и адаптацию моделей для повышения качества генерации на русском языке.

**Ключевые слова:** вопросно-ответные системы, большие языковые модели, LLM, RAG, оценка качества RAG, HyDE, BM25

**Для цитирования:** Сравнительный анализ методов RAG для построения русскоязычных интеллектуальных сервисов / А.В. Мельников, И.Е. Николаев, М.А. Русанов, В.Р. Аббазов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 5–18. DOI: 10.14529/ctcr250201

## COMPARATIVE ANALYSIS OF RAG METHODS FOR BUILDING RUSSIAN-SPEAKING INTELLIGENT SERVICES

**A.V. Melnikov**<sup>1</sup>, [MelnikovAV@uriit.ru](mailto:MelnikovAV@uriit.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1073-7108>  
**I.E. Nikolaev**<sup>2</sup>, [ivan\\_nikolaev@csu.ru](mailto:ivan_nikolaev@csu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9686-2435>  
**M.A. Rusanov**<sup>3</sup>, [RusanovMA@uriit.ru](mailto:RusanovMA@uriit.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9926-4609>  
**V.R. Abbazov**<sup>1</sup>, [AbbazovVR@uriit.ru](mailto:AbbazovVR@uriit.ru), <https://orcid.org/0009-0008-9315-2041>

<sup>1</sup> Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia

<sup>2</sup> Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>3</sup> Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

**Abstract.** The paper discusses one of the currently most popular approaches to building various types of intelligent assistants and query-response systems based on large language models (LLMs), based on in-context learning or retrieval augmented generation (RAG). The recent proliferation of publications on this topic is primarily English-oriented and utilizes leading-quality models such as GPT-4o and their developments. At the same time, evaluations of RAG context search methods for Russian language tasks are practically absent, which makes it an urgent task to conduct research aimed at adapting and evaluating these methods for the Russian language. **Aim.** To study the effectiveness of different retrieval augmented generation (RAG) approaches for Russian-language tasks, given that most studies in this area are English-oriented and use leading models such as GPT-4. **Materials and Methods.** The paper reviews three basic approaches to RAG construction: naive RAG, HyDE, and a probabilistic approach based on the BM25 function. Particular attention is paid to assessing the quality of these methods in terms of the mean average precision (mAP) metric for the three knowledge domains. Combined RAG methods such as SelfRAG were not used to obtain separate evaluations of each approach. Russian language text corpora were selected for the experiments for the knowledge domains: oil and gas industry and jurisprudence. **Results.** The conducted study allowed us to obtain quality scores for each of the considered methods. The results agree well with the data of other studies, but are inferior to the known RAGs in English. **Conclusion.** The obtained results can be used as baseline evaluations and as a basis for making decisions on selecting optimal RAG architectures for Russian-language tasks. Further research will be aimed at integrating combined methods and adapting models to improve the quality of Russian language generation.

**Keywords:** question and answer systems, large language models, LLM, RAG, quality assessment RAG, HyDE, BM25

**For citation:** Melnikov A.V., Nikolaev I.E., Rusanov M.A., Abbazov V.R. Comparative analysis of RAG methods for building Russian-speaking intelligent services. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(2):5–18. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250201

### Введение

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к интеллектуальным помощникам и вопросно-ответным системам, базирующимся на больших языковых моделях (от англ. LLM – Large Language Model). Успех таких технологий во многом обусловлен их способностью обрабатывать и генерировать текст, что делает их важными инструментами в различных сферах – от образования до бизнеса. Особенно актуально применение таких подходов для работы с русскоязычными данными, однако большинство существующих исследований сосредоточено на английском языке, оставляя пробелы в понимании и оценке методов, применимых к русскоязычным системам.

Модели, основанные на подходах in-context learning и retrieval augmented generation (от англ. RAG – Retrieval-Augmented Generation), способны значительно повысить качество взаимодействия с пользователем, однако их адаптация к русскому языковому контексту требует дополнительного анализа и исследования. В то время как технология RAG достигла значитель-

ных успехов в англоязычной среде, отсутствие систематических оценок и сравнений для русского языка ограничивает возможности разработки эффективных технологий в этом языковом сегменте.

Актуальность данного исследования заключается в необходимости создания и оценки методик применения RAG в контексте русскоязычных данных. Результаты исследования помогут создать базис для дальнейших сравнений и улучшений в области разработки интеллектуальных систем, а также способствовать более широкому внедрению технологий обработки языка в русскоязычной среде.

Большие языковые модели демонстрируют впечатляющие возможности, но сталкиваются с такими проблемами, как галлюцинации, устаревшая информация и не отслеживаемые процессы аргументации модели. Технология RAG стала многообещающим решением, включающим информацию из внешних баз данных. Применение RAG повышает точность и достоверность ответов системы, особенно для задач, требующих больших объемов данных, и позволяет непрерывно обновлять и интегрировать информацию, специфичную для предметной области [1].

Было предложено много подходов RAG для улучшения больших языковых моделей посредством зависимых от запроса изменений [1–3]. Типичный алгоритм RAG содержит несколько последовательных этапов обработки:

- 1) классификация запроса – определение необходимости поиска и набора документов для заданного входного запроса;
- 2) поиск – эффективное получение релевантных документов для запроса;
- 3) повторное ранжирование – уточнение порядка найденных документов на основе их релевантности запросу;
- 4) переупаковка – организация найденных документов в структурированную форму для повышения эффективности;
- 5) обобщение – извлечение ключевой информации для создания ответа из переупакованного документа и устранения избыточности.

Реализация RAG также требует принятия решений о том, как правильно разбивать документы на фрагменты, какие модели эмбединга использовать для семантического представления этих фрагментов, как выбрать векторные базы данных для эффективного хранения представлений признаков и как эффективно настраивать большие языковые модели.

Дополнительную сложность и трудность представляет вариативность реализации каждого этапа типичного рабочего процесса RAG. Например, при поиске релевантных документов по входному запросу могут использоваться различные методы. Одним из таких методов может быть переписывание запроса, а затем использование его для поиска [4]. В качестве альтернативы можно сначала сгенерировать псевдоответы на запрос, а затем сравнить сходство между этими псевдоответами и документами для поиска [5]. Другой вариант – непосредственное использование эмбединга, которому обычно обучаются контрастным способом на парах положительных и отрицательных запросов-ответов [6, 7]. Выбранные для каждого этапа методы и их комбинации существенно влияют как на эффективность, так и на производительность RAG. При этом следует учитывать, что для существенной части прикладных решений требуется обеспечение конфиденциальности данных, и, как следствие, появляется ограничение на использование только локальных моделей.

В контексте RAG очень важно эффективно извлекать соответствующие документы из источника данных [1], при этом одним из ключевых вопросов является выбор соответствующей модели эмбединга.

В RAG поиск осуществляется путем вычисления сходства между эмбедингами запросов и фрагментов документов, при этом ключевую роль играет способность моделей эмбедингов к семантическому представлению. Наиболее популярные модели эмбедингов – BERT. Наравне с моделями эмбедингов применяется вероятностный алгоритм BM25, однако в последних исследованиях были представлены такие известные модели эмбедингов, как AngIE, Voyage, BGE [8–10]. Стоит отметить, что не существует универсального ответа на вопрос, какую модель эмбединга использовать; как указано в статье [1], модели с разной архитектурой лучше подходят для конкретных случаев использования.

1. Смешанный или гибридный поиск применяется, когда разреженные и плотные модели эмбединга могут извлечь выгоду друг из друга, так как отражают различные характеристики релевантности информации. Например, разреженные модели поиска могут быть использованы для получения начальных результатов поиска для обучения плотных моделей поиска. Также разреженные модели могут улучшить возможности плотных моделей поиска без примеров и помочь плотным моделям обрабатывать запросы, содержащие редкие сущности, тем самым повышая устойчивость.

2. Тонкая настройка модели эмбединга применяется в случаях, когда контекст значительно отличается от обучающего набора данных, особенно в узкоспециализированных дисциплинах, таких как здравоохранение, юриспруденция и другие отрасли, изобилующие специализированными терминами. Тонкая настройка модели эмбединга происходит на собственном наборе данных по конкретной тематике и уменьшает расхождение в семантике текстов.

Наличие шума или противоречивой информации во время поиска может негативно повлиять на качество работы RAG. Эту ситуацию образно описывают, как «дезинформация может быть хуже, чем отсутствие информации вообще». Повышение устойчивости RAG к таким нежелательным входным данным становится популярным в исследованиях и стало ключевой метрикой производительности [11–13]. Согласно [14], результаты проведенного анализа типа извлекаемых документов и оценки релевантности документов запросу, их положение и количество, включенное в контекст, показывают, что включение нерелевантных документов может неожиданно повысить точность более чем на 30 %, что противоречит первоначальному предположению о снижении качества. Эти результаты подчеркивают важность разработки специализированных стратегий для интеграции поиска с моделями генерации языка, а также необходимость дальнейших исследований и изучения надежности RAG.

Важно отметить, что для оценки выбора релевантных документов и оценки ответов больших языковых моделей нет общепризнанных метрик оценки качества. Чаще всего метрики EM, F1, BLEU или ROUGE используют для оценки ответа на вопрос [4, 15–17], ассигасу используют для оценки наличия факта в ответе [15, 18]. Для оценки качества выбора релевантных документов используются такие метрики, как mean average precision (mAP), которая учитывает как точность извлечения, так и порядок извлеченных документов, а также mean reciprocal rank (MRR) [19, 20].

Отдельно выделим автоматизированные метрики библиотеки RAGAS (от англ. Retrieval Augmented Generation Assessment) [21, 22], для оценки ответа на вопрос используются метрики *Answer relevance*, *Answer correctness*, *Faithfulness*, а для оценки выбора контекста для ответа на вопрос используются метрики *Context precision*, *Context recall*, *Context utilization* [23].

В работе проводится сравнение различных базовых подходов к построению RAG, включающих naïve RAG, HyDE и BM25, с возможностью последующего построения гибридного RAG для достижения наилучших результатов под различные задачи.

### **Данные и модели**

#### ***Источники данных***

Для проведения экспериментов использовалось 3 источника данных, разделенных по предметным областям: информационные технологии (на английском языке), нормативно-правовые акты ХМАО-Югры (на русском языке) и учебно-методические издания по нефтегазовой отрасли (на русском языке). Так как цель эксперимента – сравнить модели для русского языка, то основными считались датасеты по нормативно-правовым актам ХМАО-Югры и учебно-методические издания по нефтегазовой отрасли, а датасет по информационным технологиям был вспомогательным. Информация в источниках данных была представлена в виде книг, статей, отзывов, различного вида нормативных документов. Далее они были преобразованы в текстовые документы и разделены на чанки (текстовые блоки) с использованием RecursiveCharacterTextSplitter из библиотеки LangChain [24]. Итоговая информация по исходным датасетам представлена в табл. 1.

Таблица 1

Исходные датасеты

Table 1

Source datasets

Предметная область	Виды документов	Кол-во чанков
Юриспруденция (LAW)	Нормативно-правовые акты, действующие на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры	15 803
Нефтегазовая промышленность (OIL)	Специализированные тексты, охватывающие вопросы разработки месторождений, геологии и технологий добычи нефти и газа	4 708
Информационные технологии (IT)	Открытый набор данных WMT 2016 IT Translation Task, содержащий ответы на вопросы по устранению неполадок в сфере аппаратного и программного обеспечения	217

**Данные для оценки**

Для каждой предметной области было сформировано по 40 образцов. Примеры данных из оценочных датасетов представлены в табл. 2. Каждая единица данных в оценочных датасетах представляет собой комплексную структуру, состоящую из следующих элементов:

1. Вопрос. Сформулированный запрос, требующий ответа.
2. Контексты. Подбор релевантных текстовых фрагментов, служащих основой для формирования ответа.
3. Правильный ответ. Эталонный ответ, соответствующий заданному вопросу.
4. Категоризация вопроса по типу: простой, требующий рассуждения (вопросы, требующие от модели рассуждения для эффективного ответа), условный (вопрос, основанный на цепочке связей «А→В→С»), мультиконтекстный (вопрос сформирован на основании нескольких фрагментов текста).

Всего правильных контекстов (текстовых фрагментов) для областей данных «информационные технологии», «юриспруденция», «нефтегазовая промышленность» – 52, 52, 53 соответственно.

Таблица 2

Пример данных из оценочных датасетов

Table 2

Example of data from estimated datasets

Область данных	Вопрос	Контекст	Правильный ответ
Информационные технологии (IT)	How can you reset the browser settings to default?	Update the network card driver. Install the drivers for your wireless card. Try with another computer and browser. If the situation persists, the problem is with the website itself. Please check if the network cable is properly connected. Check the IP settings and open the respective ports on the router VPI = 0, VCI = 35 You must access the internal page of the router and perform the opening via 'port forwarding' or DMZ host. In case you changed the password, I suggest you reset the equipment to get back to factory settings...	Try to delete the navigation history, the temporary files and restore to default the browser settings

Область данных	Вопрос	Контекст	Правильный ответ
Юриспруденция (LAW)	Каковы основные функции Управления по делам архивов Ханты-Мансийского автономного округа?	Постановление Правительства Ханты-Мансийского автономного округа от 16 октября 2000 г. N 21-п Об Управлении по делам архивов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. В целях приведения Положения об Управлении по делам архивов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры...	Основные функции Управления по делам архивов Ханты-Мансийского автономного округа включают проведение государственной политики в сфере архивного дела, контроль за сохранностью, комплектованием и использованием документов
Нефтегазовая промышленность (OIL)	Какую роль играют газовые сепараторы в повышении эффективности работы насосов в скважинах с подводной устьевой арматурой?	Недавно системы винтовых насосов, извлекаемых при помощи канатно-тросовых операций, были использованы в скважинах с большим отклонением от вертикали в регионе Юго-Восточной Азии. Применение винтовых насосов в этом случае было усложнено проблемами выноса пластового песка, отложениями солей, добычей тяжелой нефти и заканчиванием скважин с малым диаметром НКТ...	Газовые сепараторы способствуют повышению эффективности работы насосов в скважинах с подводной устьевой арматурой за счет уменьшения объемов свободного газа, поступающего на вход насоса

### **Векторные модели**

Одним из главных элементов RAG-систем является модель генерации эмбедингов. Для генерации эмбедингов использовались модели `intfloat/e5-mistral-7b-instruct` [25] (далее `mistral`), которая является архитектурой для генерации текстовых эмбедингов, основанной на большой языковой модели `Mistral-7B`, и модель `infloat/multilingual-e5-large` [26] (далее `e5`), которая основана на модели `xml-roberta-large`. Отличительной чертой модели `e5-mistral-7b-instruct` является дообучение на синтетических данных, сгенерированных с помощью GPT-4, что позволило достичь высоких показателей на бенчмарках MTEB и BEIR. Указанные модели выбраны из-за их способности эффективно обрабатывать различные задачи, связанные с текстовыми эмбедингами, что подтверждается высокими позициями в бенчмарке MTEB для русского языка [27]. В качестве векторного индекса использовалась библиотека FAISS [28]. FAISS является мощным инструментом для поиска документов на основе их векторных представлений, обеспечивая высокую скорость и точность поиска на больших наборах данных.

### **Описание экспериментов**

#### ***Подготовительный и финальный этапы – общие для всех экспериментов***

Для экспериментов, требующих генерации эмбедингов, использовались две векторные модели – `mistral` размерностью 4096 и `e5` размерностью 1024. При формировании чанков использовался метод `RecursiveCharacterTextSplitter` из библиотеки `langchain` [29], формирующий чанки размером 2048 и перекрытием 256 символов.

*Алгоритм действий финального этапа генерации ответов:*

1. Отбор двух наиболее релевантных чанков.

2. Формирование контекста. Отобранные чанки объединялись с исходным вопросом в единый контекст.

3. Генерация финального ответа языковой моделью, используя предоставленный контекст и собственные знания.

Для каждого эксперимента были определены уровни количества чанков в поисковой выдаче ретриверов: 1, 3, 5, 10, 20, 50, 100. Все последующие метрики рассчитывались для этих уровней отдельно.

Далее представлены эксперименты с описанием особенностей их реализации.

### **Эксперимент 1. Наивный RAG**

В первом эксперименте была применена стандартная архитектура RAG. Данная архитектура представляет собой гибридный подход, сочетающий преимущества информационного поиска и генеративных языковых моделей.

#### *Алгоритм эксперимента № 1:*

1. Подготовительный этап:

- a) формирование хранилища чанков;
- b) построение векторного хранилища чанков;
- c) настройка конфигурации ретривера по векторному хранилищу чанков;

2. Процесс извлечения:

- a) векторизация запроса, совместимая с векторами чанков;
- b) семантический поиск. Отбор наиболее релевантных чанков между вектором запроса и векторами чанков;
- c) ранжирование отобранных чанков по степени релевантности.

3. Генерация ответа (см. описание выше).

### **Эксперимент 2. RAG + HyDE**

Во втором эксперименте была использована модифицированная архитектура RAG с интеграцией метода HyDE (Hypothetical Document Embeddings) [30]. Данная модификация направлена на улучшение процесса извлечения релевантной информации путем генерации гипотетического ответа.

#### *Алгоритм эксперимента № 2:*

1. Подготовительный этап (см. описание выше):

- a) формирование хранилища чанков;
- b) построение векторного хранилища чанков;
- c) настройка конфигурации ретривера по векторному хранилищу чанков;
- d) оптимизация параметров HyDE. Настройка гиперпараметров для генерации гипотетического ответа и его интеграции в процесс поиска.

2. Генерация гипотетического ответа языковой моделью:

- a) для генерации гипотетического ответа использовался промпт: «Ответь на вопрос пользователя. Твой ответ должен быть не длиннее 50 слов».

3. Усовершенствованное извлечение:

- a) векторизация гипотетического ответа. Сгенерированный ответ преобразовывался в векторное представление, совместимое с векторами чанков;
- b) семантический поиск наиболее релевантных чанков между вектором гипотетического ответа и векторами чанков;
- c) ранжирование отобранных чанков по степени релевантности.

4. Генерация ответа (см. описание выше).

В данном эксперименте проводилось дополнительное исследование влияния длины сгенерированных гипотетических ответов на качество информационного поиска. Тестировались 4 вариации длины сгенерированных ответов: короткая (short), средняя (medium), длинная (long), без ограничений (unlimited) (табл. 3).

Средние длины сгенерированных гипотетических ответов по методу HyDE

Table 3

Average lengths of generated hypothetical responses using the HyDE method

Область данных	Короткая (short)	Средняя (medium)	Длинная (long)	Без ограничений (unlimited)
LAW	345	1078	1419	3303
OIL	318	885	1470	3110
IT	397	855	1173	2710

### Эксперимент 3. BM25

В третьем эксперименте был использован метод Окари BM25 [31], один из наиболее широко используемых и эффективных методов ранжирования в информационном поиске. Разработанный в 1990-х годах, этот алгоритм основан на пробабилистической модели поиска и улучшает релевантность документов, учитывая частоту терминов и длину документов.

Окари BM25 эффективно ранжирует документы, справляясь с избыточностью терминов в длинных документах, и хорошо масштабируется для больших коллекций. Он широко используется в современных поисковых системах, таких как Elasticsearch и Apache Lucene, благодаря своей эффективности и простоте реализации. В последние годы наблюдается рост интереса к гибридным методам, сочетающим BM25 с нейронными сетями и машинным обучением, что позволяет улучшить качество ранжирования, используя преимущества как традиционных, так и современных алгоритмов.

### Описание метрик оценки RAG-систем

Mean Average Precision (MAP) – это метрика, используемая для оценки качества систем поиска информации, таких как системы поиска текста. Она учитывает как точность (precision), так и полноту (recall) поиска. Давайте рассмотрим формулы для расчета MAP для задачи text retrieval.

1. Точность@k (precision@k, P) на позиции k (Precision@k) определяется как доля релевантных документов среди первых k документов, возвращаемых системой:

$$\text{Precision@k} = (\text{Количество релевантных документов среди первых } k) / k. \quad (1)$$

2. Средняя точность (average precision, AP) для одного запроса – это среднее значение точности в точках где найдены релевантные документы:

$$\text{AP} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M P(k) \cdot r(k), \quad (2)$$

где N – количество релевантных документов;

M – общее количество документов;

P(k) – точность на позиции k;

r(k) – бинарная метка релевантности документа на позиции k (1 – если документ релевантен, и 0 – если нет).

3. Усредненная средняя точность (mean average precision, MAP) – это усредненное значение средней точности по всем запросам:

$$\text{MAP} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \text{AP}_q, \quad (3)$$

где Q – количество запросов;

AP<sub>q</sub> – средняя точность для запроса q.

Рассмотрим пример с одним запросом и списком документов, возвращаемых системой:

- возвращаемые документы: [D1, D2, D3, D4, D5];

- релевантные документы: [D1, D3, D5].

1. Расчет точности@k:

- $P(1) = \frac{1}{1} = 1$ ;

- $P(2) = \frac{1}{2} = 0,5$ ;

•  $P(1) = \frac{2}{3} = 0,67;$

•  $P(1) = \frac{1}{2} = 0,5;$

•  $P(1) = \frac{3}{5} = 0,6.$

2. Расчет средней точности:

$$AP = \frac{1}{3} = (1 \cdot 1 + 0,67 \cdot 1 + 0,6 \cdot 1) \approx 0,76.$$

3. Расчет усредненной средней точности. Если у нас несколько запросов, тогда мы усредняем полученные средние точности для всех запросов.

### Результаты и обсуждение

В данном разделе представлены результаты экспериментов, проведенных для оценки эффективности различных методов retrieval augmented generation (RAG).

На рис. 1 представлен график зависимости количества правильных документов от размера поисковой выдачи для метода BM25 для набора данных «нефтегазовая промышленность». График демонстрирует, что с увеличением размера поисковой выдачи количество правильных документов также увеличивается, достигая пика на уровне 49 правильных документов из 53 возможных при 50 документах в выдаче.

Исходя из анализа графика на рис. 1, можно заключить, что размер поисковой выдачи в 20 чанков является оптимальным, так как он обеспечивает баланс между качеством и вычислительными затратами. На этом уровне достигается значительное количество правильных документов (90 % от максимума), и дальнейшее увеличение размера выдачи не приводит к существенному росту точности, что не оправдывает дополнительных вычислительных ресурсов.

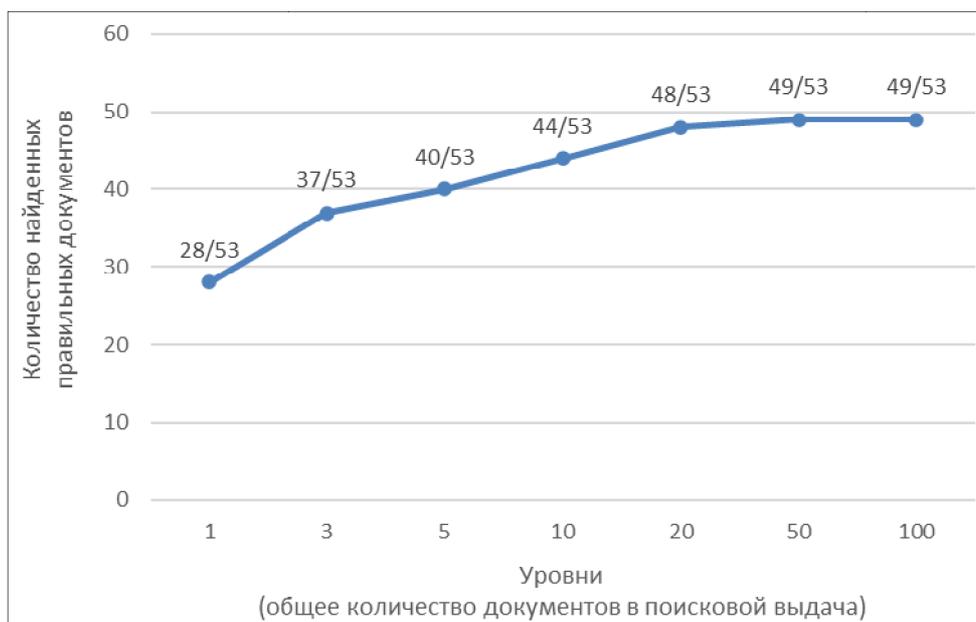


Рис. 1. График зависимости количества правильных документов от размера поисковой выдачи для метода bm25 для набора данных «нефтяная промышленность»

Fig. 1. Graph of the dependence of the number of correct documents on the size of the search output for the bm25 method for the oil industry dataset

На рис. 2 приведено сравнение эффективности методов BM25, naive\_e5 и naive\_mistral для набора данных «нефтегазовая промышленность». Из графика видно, что метод BM25 показывает наилучшие результаты на малых уровнях поисковой выдачи. Методы naive\_e5 и naive\_mistral также демонстрируют хорошие результаты, но уступают BM25, особенно на малых уровнях выдачи.

Табл. 4 представляет результаты экспериментов для 20 документов в поисковой выдаче по трем предметным областям. Из табл. 4 видно, что метод BM25 показывает наилучшие результаты для набора данных «нефтегазовая промышленность», достигая 49 правильных документов из

53 возможных с  $mAP@20$ , равным 0,737. Метод HyDE с моделью mistral также показывает высокие результаты, особенно при использовании длинных гипотетических ответов. Например, для набора данных «нефтегазовая промышленность» HyDE с моделью mistral показывает 46 правильных документов из 53 возможных с  $mAP@20$ , равным 0,562.

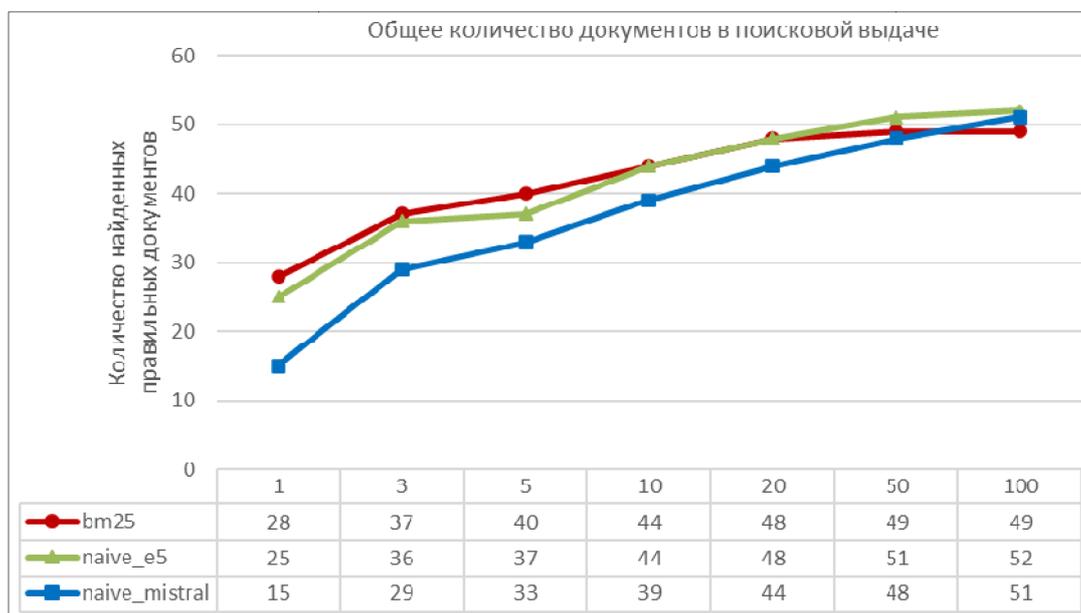


Рис. 2. График зависимости количества правильных документов от размера поисковой выдачи для метода bm25, naive\_e5, naive\_mistral для набора данных «нефтяная промышленность»  
Fig. 2. Graph of the dependence of the number of correct documents on the size of the search output for the bm25, naive\_e5, and naive\_mistral methods for the oil industry dataset

Результаты экспериментов для 20 документов в поисковой выдаче по трем предметным областям

Таблица 4

The results of experiments for 20 documents in search results in three subject areas

Table 4

Набор данных	Название метода	Векторная модель	Количество правильных документов	$mAP@20$	Процент по уровням	Не найдено документов
IT	naive	e5	43	0,51	0,83	9
IT	naive	mistral	45	0,53	0,87	7
IT	hyde (unlimited)	e5	44	0,49	0,85	8
IT	hyde (unlimited)	mistral	46	0,58	0,88	6
IT	bm25lc		44	0,52	0,85	8
IT	bm25lc (preproc)		43	0,55	0,83	9
OIL	naive	e5	48	0,68	0,92	4
OIL	naive	mistral	44	0,52	0,85	8
OIL	hyde (unlimited)	e5	40	0,53	0,77	12
OIL	hyde (unlimited)	mistral	46	0,56	0,88	6
OIL	bm25lc		48	0,74	0,92	4
OIL	bm25lc (preproc)		49	0,74	0,94	3
LAW	naive	e5	37	0,34	0,71	15
LAW	naive	mistral	39	0,40	0,75	13
LAW	hyde (unlimited)	e5	30	0,31	0,58	22
LAW	hyde (unlimited)	mistral	37	0,38	0,71	15
LAW	bm25lc (preproc)		36	0,39	0,69	16
LAW	bm25lc (preproc)		37	0,40	0,71	15

Табл. 5 представляет результаты экспериментов для различных вариаций метода Hyde. Из табл. 5 видно, что длина сгенерированных гипотетических ответов существенно влияет на качество результатов. Например, для набора данных «нефтегазовая промышленность» метод Hyde с моделью mistral и длинными гипотетическими ответами показывает 46 правильных документов из 53 возможных с mAP@20, равным 0,562, в то время как короткие гипотетические ответы дают менее стабильные результаты.

Таблица 5

Результаты экспериментов для 20 документов в поисковой выдаче  
для вариаций методов hyde

Table 5

Experimental results for 20 documents in search results for variations of hyde methods

Набор данных	Название метода	Векторная модель	Количество правильных документов	mAP@20	Процент по уровням	Не найдено документов
IT	hyde (unlimited)	e5	44	0,489	0,85	8
IT	hyde (unlimited)	mistral	46	0,577	0,88	6
IT	hyde (short)	e5	42	0,515	0,81	10
IT	hyde (short)	mistral	45	0,526	0,87	7
IT	hyde (medium)	e5	44	0,532	0,85	8
IT	hyde (medium)	mistral	46	0,515	0,88	6
IT	hyde (long)	e5	41	0,484	0,79	11
IT	hyde (long)	mistral	46	0,526	0,88	6
OIL	hyde (unlimited)	e5	40	0,528	0,77	12
OIL	hyde (unlimited)	mistral	46	0,562	0,88	6
OIL	hyde (short)	e5	43	0,541	0,83	9
OIL	hyde (short)	mistral	46	0,408	0,88	6
OIL	hyde (medium)	e5	46	0,571	0,88	6
OIL	hyde (medium)	mistral	46	0,505	0,88	6
OIL	hyde (long)	e5	44	0,571	0,85	8
OIL	hyde (long)	mistral	46	0,532	0,88	6
LAW	hyde (unlimited)	e5	30	0,308	0,58	22
LAW	hyde (unlimited)	mistral	37	0,382	0,71	15
LAW	hyde (short)	e5	28	0,261	0,54	24
LAW	hyde (short)	mistral	33	0,29	0,63	19
LAW	hyde (medium)	e5	30	0,227	0,58	22
LAW	hyde (medium)	mistral	35	0,318	0,67	17
LAW	hyde (long)	e5	33	0,256	0,63	19
LAW	hyde (long)	mistral	40	0,321	0,77	12

### Заключение

В проведенном исследовании была проанализирована эффективность различных подходов к построению систем на базе технологий retrieval augmented generation (RAG) для работы с текстами на русском языке. Были рассмотрены несколько базовых методов RAG, включая наивный RAG, Hyde и BM25, и проведена их оценка по метрикам качества с использованием метрики mean average precision (mAP).

Основные выводы исследования можно сформулировать следующим образом:

1. Наивный RAG: Этот метод продемонстрировал стабильные результаты, особенно в сочетании с векторными моделями, такими как mistral и e5. Например, для набора данных «нефтегазовая промышленность» наивный RAG с моделью e5 показал 48 правильных документов из 53 возможных при 20 документах в поисковой выдаче с mAP@20, равным 0,677. Это подтверждает его эффективность для задач поиска и генерации ответов на русском языке.

2. HyDE: Метод HyDE, основанный на генерации гипотетических ответов, показал различные результаты в зависимости от длины сгенерированных ответов и используемых векторных моделей. В некоторых случаях HyDE превосходил наивный RAG, особенно при использовании модели *mistral* и длинных гипотетических ответов. Например, для набора данных «нефтегазовая промышленность» HyDE с моделью *mistral* показал 46 правильных документов из 53 возможных при 20 документах в поисковой выдаче с *mAP@20*, равным 0,562. Это свидетельствует о потенциале HyDE для улучшения качества ответов при правильной настройке параметров.

3. BM25: Традиционный метод BM25 также показал высокие результаты, особенно в предметной области «нефтегазовая промышленность». Например, BM25 показал 49 правильных документов из 53 возможных при 20 документах в поисковой выдаче с *mAP@20*, равным 0,737. Это делает его конкурентоспособным по сравнению с более современными методами.

Результаты исследования подчеркивают важность выбора подходящей векторной модели и метода ранжирования для достижения оптимальных результатов в системах RAG. Наивный RAG и BM25 могут служить надежной основой для разработки эффективных систем, в то время как HyDE предлагает перспективные возможности для улучшения качества ответов при дальнейшей оптимизации.

Таким образом, для достижения наилучших результатов в задачах генерации ответов на русском языке рекомендуется использовать гибридные подходы, сочетающие преимущества различных методов RAG. Это позволит создать более точные и контекстуально релевантные системы, способные эффективно работать с русскоязычными данными.

#### Список литературы/References

1. Gao Y., Xiong Y., Gao X., Jia K., Pan J., Bi Y., Dai Y., Sun J., Wang H. Retrieval-augmented generation for large language models: A survey. *arXiv preprint arXiv:2312.10997*. 2023.
2. Li H., Su Y., Cai D., Wang Y., Liu L. A survey on retrieval-augmented text generation. *arXiv preprint arXiv:2202.01110*. 2022.
3. Cai D., Wang Y., Liu L., Shi S. Recent advances in retrieval-augmented text generation. In: *Proceedings of the 45th international ACM SIGIR conference on research and development in information retrieval*. 2022. P. 3417–3419. DOI: 10.1145/3477495.3532682
4. Ma X., Gong Y., He P., Zhao H., Duan N. Query rewriting for retrieval-augmented large language models. *arXiv preprint arXiv:2305.14283*. 2023.
5. Gao L., Ma X., Lin J., Callan J. Precise zero-shot dense retrieval without relevance labels. *arXiv preprint arXiv:2212.10496*. 2022.
6. Wang L., Yang N., Huang X., Jiao B., Yang L., Jiang D., Majumder R., Wei F. Text embeddings by weakly-supervised contrastive pre-training. *arXiv preprint arXiv:2212.03533*. 2022.
7. Xiao S., Liu Z., Zhang P., Muennighof N. C-pack: packaged resources to advance general Chinese embedding. *arXiv preprint arXiv:2309.07597*. 2023.
8. Li X., Li J. Angle-optimized text embeddings. *arXiv preprint arXiv:2309.12871*. 2023.
9. VoyageAI, Voyage's embedding models. Available at: <https://docs.voyageai.com/embeddings> (accessed 30.01.2025).
10. BAAI, Flagembedding. Available at: <https://github.com/FlagOpen/FlagEmbedding> (accessed 30.01.2025).
11. Yoran O., Wolfson T., Ram O., Berant J. Making retrieval-augmented language models robust to irrelevant context. *arXiv preprint arXiv:2310.01558*. 2023.
12. Yu W., Zhang H., Pan X., Ma K., Wang H., Yu D. Chain-of-note: Enhancing robustness in retrieval-augmented language models. *arXiv preprint arXiv:2311.09210*. 2023.
13. Baek J., Jeong S., Kang M., Park J.C., Hwang S.J. Knowledge-augmented language model verification. *arXiv preprint arXiv:2310.12836*. 2023.
14. Cuconasu F., Trappolini G., Siciliano F., Filice S., Campagnano C., Maarek Y., Tonello N., Silvestri F. The power of noise: Redefining retrieval for rag systems. *arXiv preprint arXiv:2401.14887*. 2024.

15. Shao Z., Gong Y., Shen Y., Huang M., Duan N., Chen W. Enhancing retrieval-augmented large language models with iterative retrieval-generation synergy. *arXiv preprint arXiv:2305.15294*. 2023.
16. Ke Z., Kong W., Li C., Zhang M., Mei Q., Bendersky M. Bridging the preference gap between retrievers and llms. *arXiv preprint arXiv:2401.06954*. 2024.
17. Berchansky M., Izsak P., Caciularu A., Dagan I., Wasserblat M. Optimizing retrieval-augmented reader models via token elimination. *arXiv preprint arXiv:2310.13682*. 2023.
18. Izacard G., Lewis P., Lomeli M., Hosseini L., Petroni F., Schick T., Dwivedi-Yu J., Joulin A., Riedel S., Grave E. Few-shot learning with retrieval augmented language models. *arXiv preprint arXiv:2208.03299*. 2022.
19. Harman D. *Information retrieval evaluation*. Morgan & Claypool Publishers; 2011.
20. Saraiva T., Sousa M., Vieira P., Rodrigues A. Telco-DPR: A Hybrid Dataset for Evaluating Retrieval Models of 3GPP Technical Specifications. *arXiv preprint arXiv:2410.19790*. 2024.
21. Es S., James J., Espinosa-Anke L., Schockaert S. Ragas: Automated evaluation of retrieval augmented generation. *arXiv preprint arXiv:2309.15217*. 2023.
22. Edwards C. Hybrid Context Retrieval Augmented Generation Pipeline: LLM-Augmented Knowledge Graphs and Vector Database for Accreditation Reporting Assistance. *arXiv preprint arXiv:2405.15436*. 2024.
23. RAGAS Library. Section. Description of evaluation metrics. Available at: <https://docs.ragas.io/en/stable/concepts/metrics/index.html> (accessed 30.01.2025).
24. LangChain Library. Available at: <https://www.langchain.com/> (accessed 30.01.2025).
25. Wang L., Yang N., Huang X., Yang L., Majumder R., Wei F. Improving text embeddings with large language models. *arXiv preprint arXiv:2401.00368*. 2023.
26. Wang L., Yang N., Huang X., Yang L., Majumder R., Wei F. Multilingual e5 text embeddings: A technical report. *arXiv preprint arXiv:2402.05672*. 2024.
27. Massive Text Embedding Benchmark. Available at: <https://huggingface.co/spaces/mteb/leaderboard> (accessed 30.01.2025).
28. Douze M., Guzhva A., Deng C., Johnson J., Szilvasy G., Mazaré P.E., Jégou H. The faiss library. *arXiv preprint arXiv:2401.08281*. 2024.
29. RecursiveCharacterTextSplitter method from langchain library. Available at: [https://api.python.langchain.com/en/latest/character/langchain\\_text\\_splitters.character.RecursiveCharacterTextSplitter.html](https://api.python.langchain.com/en/latest/character/langchain_text_splitters.character.RecursiveCharacterTextSplitter.html) (accessed 30.01.2025).
30. Gao, L., Ma, X., Lin, J., & Callan, J. Precise zero-shot dense retrieval without relevance labels. *arXiv preprint arXiv:2212.10496*. 2022.
31. Robertson S.E., Walker S. Some simple effective approximations to the 2-poisson model for probabilistic weighted retrieval. In: *SIGIR'94: Proceedings of the Seventeenth Annual International ACM-SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, organised by Dublin City University*. Springer, London; 1994. P. 232–241.

### **Информация об авторах**

**Мельников Андрей Витальевич**, д-р техн. наук, проф., директор, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия; [MelnikovAV@uriit.ru](mailto:MelnikovAV@uriit.ru).

**Николаев Иван Евгеньевич**, старший преподаватель кафедры информационных технологий и экономической информатики, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия; [ivan\\_nikolaev@csu.ru](mailto:ivan_nikolaev@csu.ru).

**Русанов Михаил Александрович**, старший преподаватель инженерной школы цифровых технологий, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия; [RusanovMA@uriit.ru](mailto:RusanovMA@uriit.ru).

**Аббазов Валерьян Ринатович**, ведущий программист, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, Ханты-Мансийск, Россия; [AbbazovVR@uriit.ru](mailto:AbbazovVR@uriit.ru).

*Information about the authors*

**Andrey V. Melnikov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; MelnikovAV@uriit.ru.

**Ivan E. Nikolaev**, Senior Lecturer of the Department of Information Technologies and Economic Informatics, Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia; ivan\_nikolaev@csu.ru.

**Mikhail A. Rusanov**, Senior Lecturer of the Engineering School of Digital Technologies, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia; RusanovMA@uriit.ru.

**Valerian R. Abbazov**, Lead Programmer, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; AbbazovVR@uriit.ru.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

**Статья поступила в редакцию 17.02.2025**

**The article was submitted 17.02.2025**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СЛОЖНОГО ПЕРЕКРЕСТКА В СРЕДЕ AnyLogic

**Ю.И. Володина**, [julia\\_volodina@mail.ru](mailto:julia_volodina@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0936-0638>

**Н.О. Сергеев**, [nikitosserg5@gmail.com](mailto:nikitosserg5@gmail.com)

**А.В. Затонский**, [z xenon@narod.ru](mailto:z xenon@narod.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Березниковский филиал, Березники, Россия*

**Аннотация.** Недостаточная пропускная способность улично-дорожной сети является проблемой большинства городов. Частично эта проблема может быть решена оптимизацией работы светофора. Поскольку подбор настроек светофора в реальном времени может привести к ухудшению дорожной ситуации, целесообразно предварительно настроить модель и на ней отработать различные режимы работы светофора, подобрать оптимальные. **Цель исследования:** моделирование изменения среднего числа машин в очереди перед запрещающим сигналом светофора и среднего времени проезда перекрёстка. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи: создание модели дорожного участка с реальными потоками на входах; определение среднего числа машин в очереди при различных режимах работы светофора; создание эксперимента для нахождения среднего времени левого поворота с вводом и без ввода специализированной левоповоротной фазы светофора. **Материалы и методы.** Для решения поставленных задач опробована методика использования среды AnyLogic для анализа участка дорожного движения, показана возможность применения имитационного моделирования с целью выявления зависимости пропускной способности перекрёстка от режима работы светофора. **Результаты.** В процессе исследования создана модель существующего перекрёстка и рассмотрена зависимость числа автомобилей в очереди перед запрещающим сигналом светофора от длительности его полного цикла. Для проведения эксперимента существующий цикл работы светофора длительностью 84 с был изменен до 30 с, 1, 2, 3 и 5 мин. Для визуализации полученных зависимостей построен график, отражающий число автомобилей в пробке при различных режимах работы светофора. Созданная модель использована также для определения зависимости времени проезда перекрёстка при левом повороте от числа поворачивающих машин и числа машин во встречном направлении. Рассмотрены варианты проезда светофора с дополнительным левым сигналом светофора и без него. Результаты представлены таблицей и графически. **Заключение.** Исследование показало, что при небольшом встречном трафике введение специализированной левоповоротной фазы светофора увеличивает время проезда перекрёстка, но при увеличении встречного трафика ситуация меняется на противоположную.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, перекресток, светофор, AnyLogic, очередь, пропускная способность дороги

**Для цитирования:** Володина Ю.И., Сергеев Н.О., Затонский А.В. Исследование возможности моделирования светофорного регулирования сложного перекрестка в среде AnyLogic // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 19–32. DOI: 10.14529/ctcr250202

## STUDY OF THE POSSIBILITY OF TRAFFIC LIGHT CONTROL MODELING OF A COMPLEX INTERSECTION BY AnyLogic

**Ju.I. Volodina**, [julia\\_volodina@mail.ru](mailto:julia_volodina@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0936-0638>

**N.O. Sergeev**, [nikitosserg5@gmail.com](mailto:nikitosserg5@gmail.com)

**A.V. Zatonskiy**, [z xenon@narod.ru](mailto:z xenon@narod.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

*Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia*

**Abstract.** Insufficient capacity of the road network is a problem in most cities. This problem can be partially solved by optimizing the operation of the traffic light. Since selecting traffic light settings in real time can lead to a deterioration in the traffic situation, it is advisable to pre-configure the model and work out various traffic light operating modes on it, and select the optimal ones. **The purpose of the study** was to simulate changes in the average number of cars in a queue before a traffic light and the average travel time of an intersection. To achieve this goal, the following tasks are formulated: creating a model of a road section with real flows at the entrances; determining the average number of cars in a queue under different traffic light operating modes; creating an experiment to find the average time of a left turn with and without the introduction of a specialized left-turn phase of the traffic light. **Materials and methods.** To solve the tasks set, the method of using the AnyLogic environment for analyzing a traffic section has been tested, and the possibility of using simulation modeling to identify the dependence of the intersection's capacity on the operating mode of the traffic light has been shown. **Results.** In the course of the research, a model of the existing intersection was created and the dependence of the number of cars in the queue in front of the forbidding traffic light signal on the duration of its full cycle was considered. To conduct the experiment, the existing 84-second traffic light cycle was changed to 30 seconds, one, two, three, and five minutes. To visualize the obtained dependencies, a graph is constructed that reflects the number of cars in a traffic jam under different traffic light operating modes. The created model is also used to determine the dependence of the travel time of an intersection at a left turn on the number of turning cars and the number of cars in the opposite direction. Traffic light options with and without an additional left signal are considered. The results are presented in a table and graphically. **Conclusion.** The study showed that with a small amount of oncoming traffic, the introduction of a specialized left-turn phase of the traffic light increases the travel time of the intersection, but with an increase in oncoming traffic, the situation changes to the opposite.

**Keywords:** queue modeling, intersection, traffic light, AnyLogic, queue, road capacity

**For citation:** Volodina Ju.I., Sergeev N.O., Zatonskiy A.V. Study of the possibility of traffic light control modeling of a complex intersection by AnyLogic. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(2):19–32. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250202

### Введение

Количество автомобилей в городах растёт из года в год. По данным Росстата в Пермском крае число собственных легковых автомобилей на 1000 человек населения с 2010 до 2023 года выросло в 1,9 раза (с 187,9 в 2010 году до 361,7 в 2023 году)<sup>1</sup>. В последующие годы прогнозируется дальнейший рост числа автомобилей, что приведёт к повышенной загруженности дорог в городах. Чтобы уменьшить очереди на перекрестках, которые возникают в часы пик и которые будут только увеличиваться, нужно строить новые дороги, расширять уже существующие, строить развязки, что требует больших финансовых вложений. Наиболее малозатратным способом уменьшения очередей и, соответственно, времени ожидания проезда является оптимизация работы светофоров. Для этой цели предложено использовать моделирование дорожного движения как достаточно действенный инструмент для анализа ситуации и принятия решений.

---

<sup>1</sup> Федеральная служба государственной статистики. Количество собственных легковых автомобилей на 1000 человек населения по субъектам Российской Федерации (с 2000 по 2022 год). Ответственный исполнитель: Трошина Е.И. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/>.

Сравнивая результаты аналитического расчета и имитационного моделирования дорожного движения, авторы в работе [1] делают вывод, что моделирование более точно описывает реальную транспортную систему. Авторы также отмечают, что построение модели более трудозатратно, тем не менее эти затраты окупаются возможностями моделирования и точностью результатов.

Сравнивая системы структурного и имитационного моделирования Stratum 2000, Simulink, AnyLogic, авторы работы [2] положительно оценивают достоверность моделирования всех трёх систем. Основным достоинством AnyLogic указывается «возможность работать с проектируемыми системами на разном уровне абстракции, а также проводить оптимизацию проектируемых систем».

При моделировании дорожного движения для большей достоверности модели приходится учитывать множество факторов, таких как состояние дороги, погодные условия, регион, состояние транспортных средств, наличие действующих систем контроля за транспортными средствами, человеческий фактор. «Основной классической проблемой для моделирования дорожного движения на улично-дорожной сети города является недостижимость предполагаемых результатов макромоделей вследствие отсутствия нужных данных, случайности выбора маршрутов водителем, неопределённости дорожного движения в условиях насыщенной сети» [3].

Поиск узких мест является важным при прогнозировании дорожного движения. К.Ф. Даганцо в работе [4] утверждает, что заторы на перекрестках можно уменьшить с помощью таких мер контроля, как измерение скорости, руководство маршрутом. Применяемые модели должны предсказывать то, что имеет значение, а именно поведение узких мест, динамику очереди.

Прогнозировать предзаторовые и заторовые ситуации, планировать мероприятия для повышения пропускной способности узкого места и всей дороги в целом можно, используя анализ транспортной диаграммы для конкретного участка дороги [5].

Авторы работы [6] отмечают, что при оптимизации работы светофора «целесообразно использовать имитационное моделирование, которое позволяет изучить и проанализировать все особенности организации движения транспорта на определенном участке дороги».

В работе [7] разработана имитационная модель двух последовательных перекрёстков, синхронизирована работа этих перекрёстков. В исследовании [8] реализована имитационная модель управления светофорами с использованием алгоритмов нечеткого логического вывода, а именно алгоритма Мамдани. Алгоритм оптимизации имитационной модели работы светофора предложен в работе [9].

В исследовании [10] авторами на практике подтверждена адекватность имитационной модели перекрёстка, созданной в среде AnyLogic, предприняты корректирующие действия.

В работах [11, 12] авторами произведено исследование конкретных участков дороги и произведено моделирование в программной среде AnyLogic, сделаны выводы об эффективности применения оптимизационного эксперимента.

Наиболее неудобным и аварийным при движении через перекрёсток является поворот налево через поток движущихся навстречу машин. Проблема решается вводом левоповоротной фазы светофора. Этот вопрос раскрыт в работах [13–15].

В работе [13] автор предложил модель, которая описывает задержку поворота из-за насыщения встречного потока при отсутствии левоповоротной фазы светофора. Пропускная способность полосы при этом уменьшается.

В статье [14] представлены результаты исследования методов ввода дополнительной левоповоротной фазы светофора, определены условия, при которых введение левоповоротной секции необходимо. Авторы говорят, что «введение специализированного левого поворота должно быть необходимым и оправданным, потому что для всего рассматриваемого транспортного потока увеличивается время ожидания разрешающего сигнала».

В работе [15] рассматривается изменение интенсивности движения левоповоротного потока в зависимости от длительности разрешающего сигнала светофора. Автор отмечает, что «в настоящее время интенсивность транспортных потоков в больших городах настолько увеличилась, что применение трехфазного регулирования становится необходимостью».

В перечисленных работах показано, что образование длинных очередей часто связано с конкретной работой светофоров. Грамотный расчет «зелёных фаз» светофоров, введение дополнительных фаз может частично решить проблему пробок.

В данной работе предпринята попытка на примере конкретного участка дороги исследовать различные режимы работы светофора и установить, как меняется время проезда светофора, образование пробок при этих режимах. Перебор возможных настроек или их численная оптимизация могут позволить улучшить пропускную способность дорожной сети. Как указано выше, наличие адекватной модели при этом является первым граничным условием для проведения оптимизации. Рекламные заявления разработчика системы моделирования AnyLogic тем не менее не дают гарантии, что в нём можно воспроизвести сложный перекресток и исследовать возможность уменьшения очередей на нём.

Конечно, данная постановка цели является достаточно узкой. Хотелось бы не только подбирать разные наилучшие настройки светофоров на разные интервалы времени, но и контролировать в режиме реального времени, насколько они хороши в действительности. И время от времени в средствах массовой информации появляются материалы о том, что где-то вроде бы подобные решения разрабатываются и чуть ли не внедряются. Однако периодичность подобных заявлений, год за годом очень похожих, заставляет сделать вывод, что с результатами всё не так оптимистично, как пишут журналисты. Хорошо известно, что камер контроля полос и скорости на дорогах очень много, они приносят непосредственный доход в местные бюджеты, а вот установок из цепочек камер на последовательных опорах для видеосъёмки очереди автомобилей автограм не приходилось видеть нигде. Тем более работающих и как-то влияющих на время горения красного или зеленого поворотного сигнала.

Поэтому авторы решили сосредоточиться на реальном: опробовать возможности AnyLogic на реальном объекте и сделать вывод об адекватности результатов моделирования перекрестка с его использованием.

### Построение модели

В работе рассмотрены вопросы организации светофора на перекрёстке на основе использования имитационного моделирования и средств оптимизатора в среде AnyLogic. Модель участка дорожной сети создана на основе спутникового снимка местности. Для создания и исследования модели использована версия AnyLogic 8.8.6. Фрагмент потоковой диаграммы улично-дорожной сети показан на рис. 1.

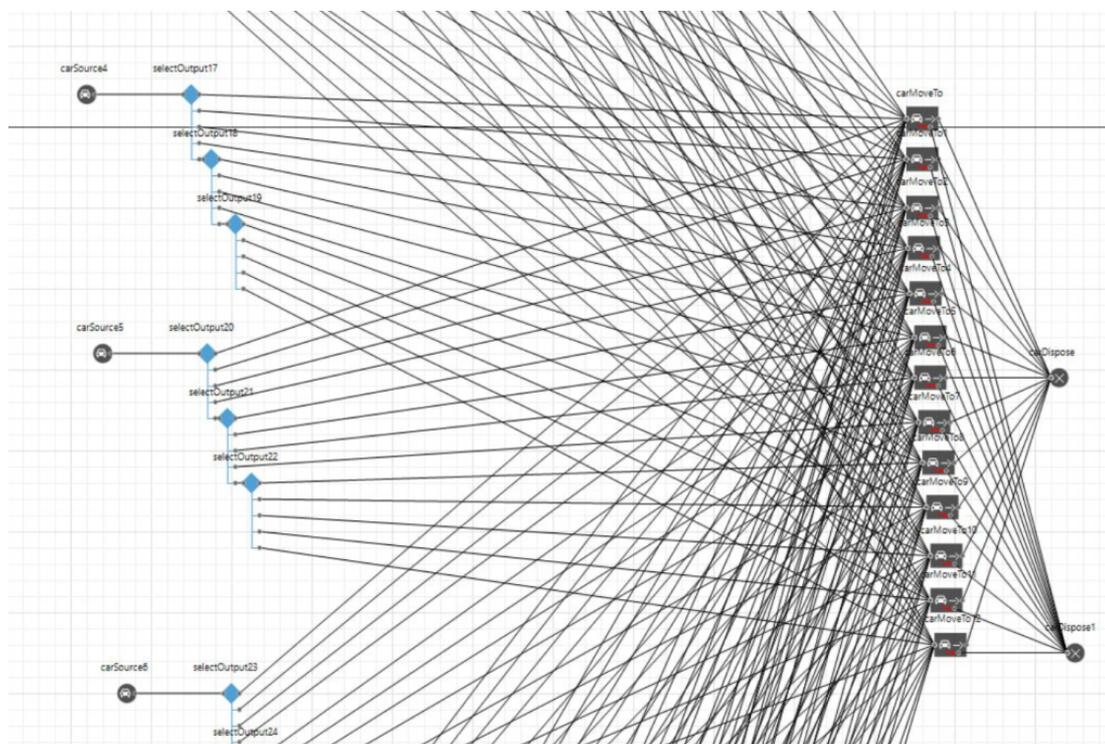


Рис. 1. Потокная диаграмма улично-дорожной сети  
Fig. 1. Flow chart of the road network

Исследование проведено на примере перекрёстка ул. Юбилейная – ул. Свердлова в г. Березники. Исследуемый перекрёсток имеет 10 точек входа: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – точки входа по ул. Юбилейной; 7, 8, 9, 10 – точки входа по ул. Свердлова (рис. 2).

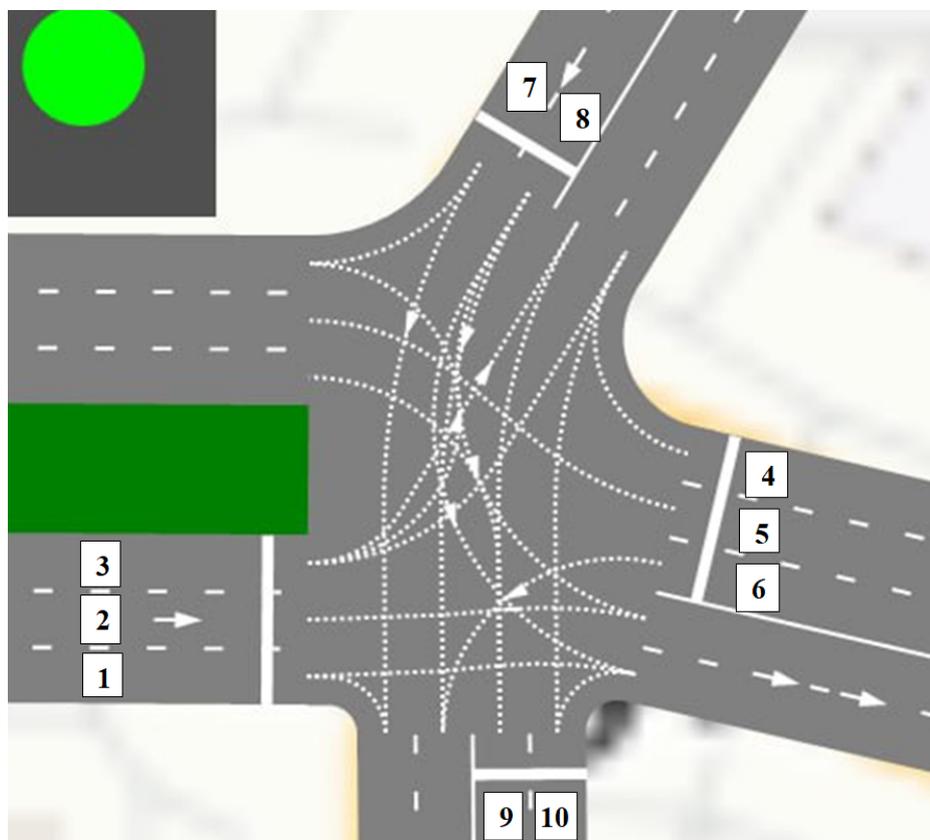


Рис. 2. Графическое представление моделируемого перекрёстка  
Fig. 2. Graphical representation of the simulated intersection

При построении модели были учтены существующие настройки светофора: параметры переключения режимов работы светофора, наличие дополнительной секции светофора, разрешающей поворот налево с крайней левой полосы, а также возможность поворота направо с крайней правой полосы.

Цикл работы светофора показан на рис. 3.

	Полный цикл	Режим работы светофора			
		Зеленый	Красный	Зеленый	Красный
ул. Свердлова	84		34	50	34
ул. Юбилейная от Мелодии поворот налево (в сторону моста)	84	20	64	20	64
ул. Юбилейная	84		30	54	30

Рис. 3. Режим работы светофора  
Fig. 3. Traffic light operation mode

Интенсивность транспортных потоков указана на рис. 4.

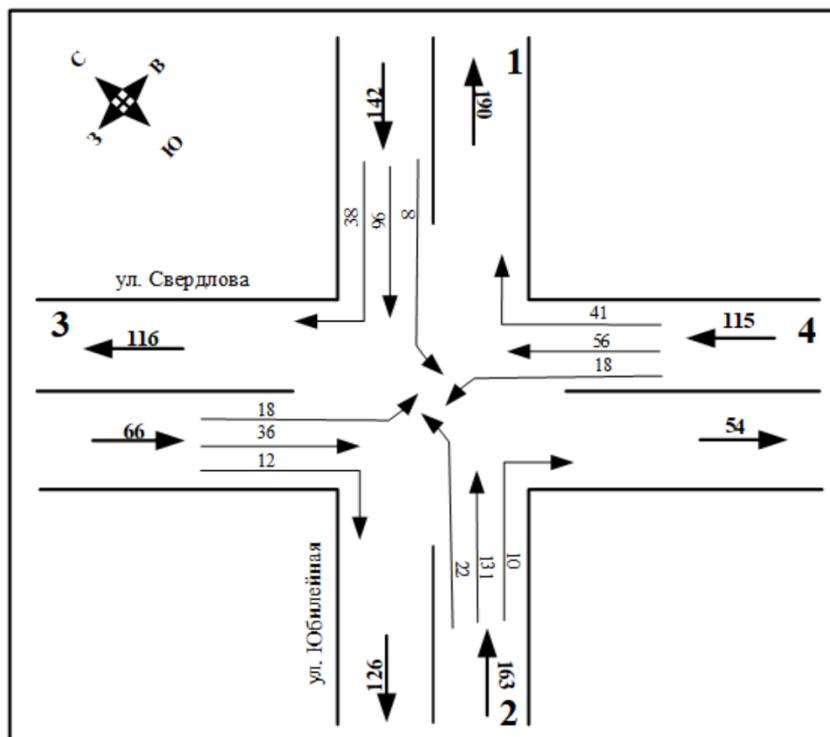


Рис. 4. Интенсивность транспортных потоков в утренний час-пик<sup>2</sup>  
Fig.4. The intensity of traffic flows during the morning rush hour

### Результаты моделирования

При существующем режиме работы светофора, описанном выше, в период пиковой нагрузки наблюдается скопление машин на перекрёстке в точках входа 1, 2, 5, 6, т. е. при движении по ул. Юбилейной прямо (рис. 5). Это соответствует ситуации на данном участке с работой светофоров в существующем режиме.

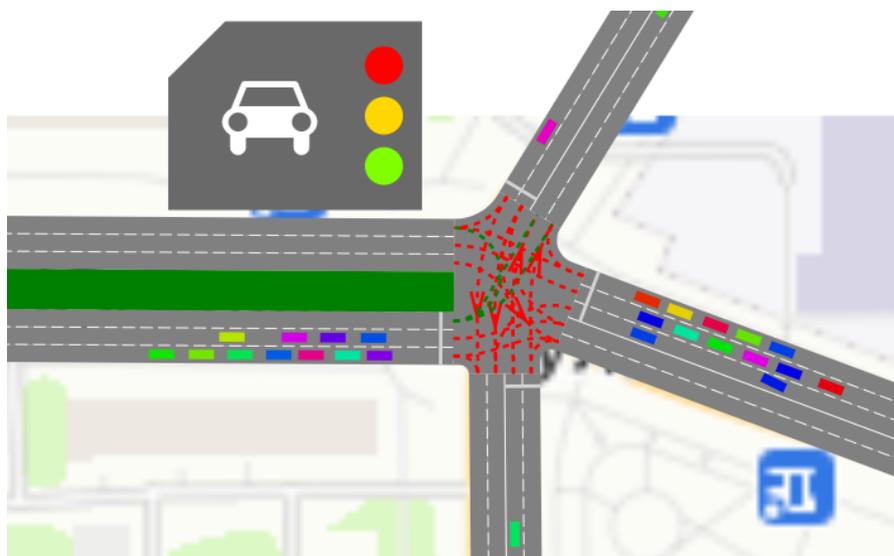


Рис. 5. Ожидание проезда перекрёстка при максимальной нагрузке при существующем режиме светофора  
Fig. 5. Waiting for the intersection to pass at maximum load with the existing traffic light mode

<sup>2</sup> Комплексная схема организации дорожного движения города Березники Пермского края. Т. 1. Отчет по сбору исходных данных. Ставрополь, 2020. URL: <https://adm-brz.ru/upload/docs/Kompleksnaya-shema-organizatsii-dorozhnogo-dvizheniya-goroda-Berezniki-Permskogo-kрая.zip> (дата обращения: 16.10.2024).

Поскольку в пиковые нагрузки большая часть машин движется по ул. Юбилейная прямо (на левый поворот уходит только 10 % машин), в модели увеличили время зелёного сигнала прямо по ул. Юбилейной и прямо по ул. Свердлова на 10 с. Это практически не изменило ситуацию на перекрёстке (табл. 1).

При увеличении полного цикла работы светофора до 5 мин (пропорционально существующему графику) наблюдаем увеличение скопления машин во всех точках входа (рис. 6).

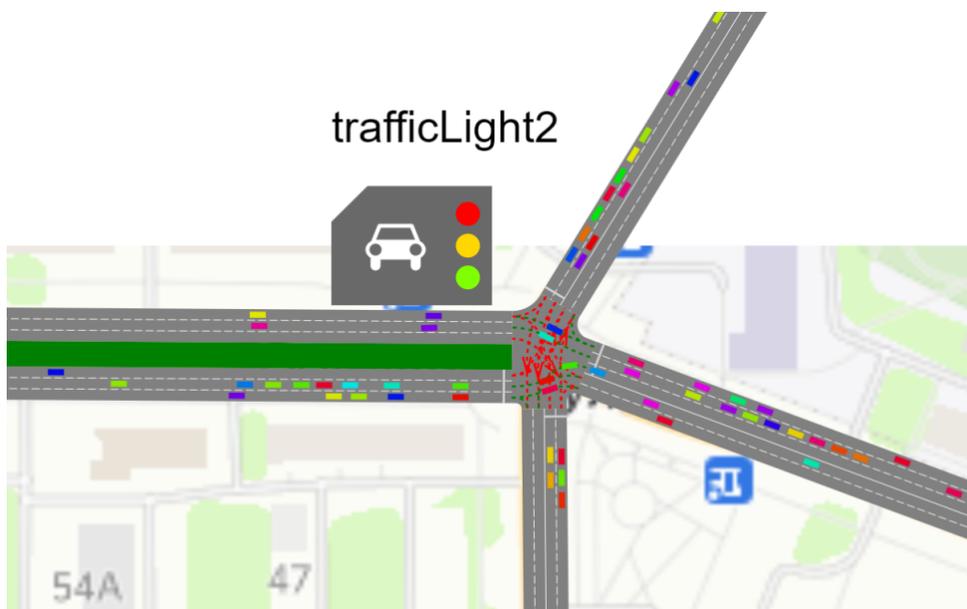


Рис. 6. Цикл работы светофора 5 мин  
Fig. 6. The traffic light operation cycle is 5 min

Сокращение полного цикла работы светофора до 30 с уменьшило число автомобилей, ожидающих левый поворот из точки 6 по сравнению с существующим режимом работы светофора (рис. 7). По сравнению с циклом 5 мин число ожидающих проезда машин уменьшилось во всех точках. Но при этом интенсивность смены траекторий движения увеличивается, что может повысить аварийность на перекрёстке.

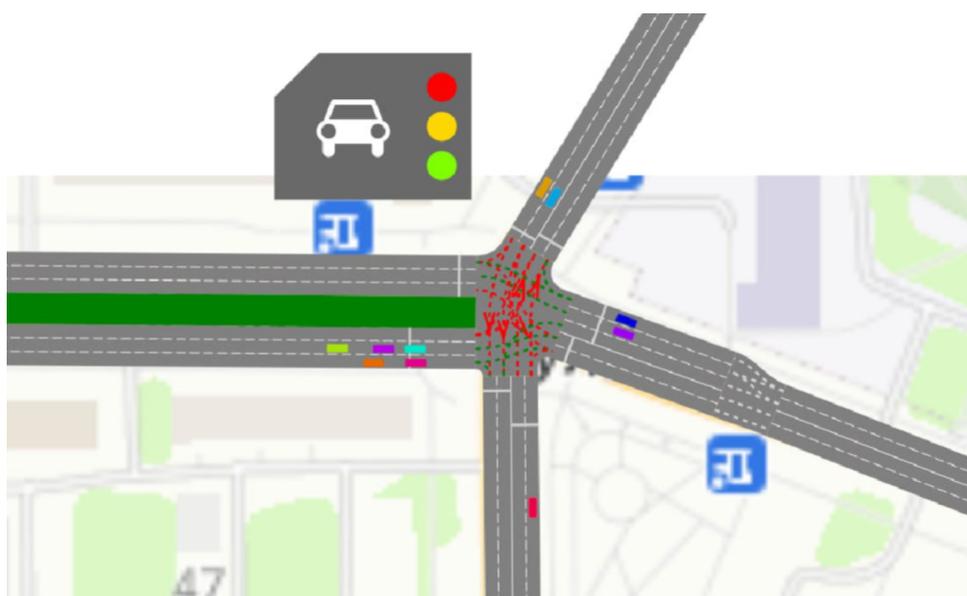


Рис. 7. Цикл работы светофора 30 с  
Fig. 7. Traffic light operation cycle of 30 s

Наибольшее число машин, ожидающих проезд перекрёстка, при рассмотренных режимах работы светофора показано в табл. 1. Также в табл. 1 занесены данные по числу машин в пробке при продолжительности цикла работы светофора 1, 2 и 3 мин. Режим работы светофора изменялся пропорционально существующему.

Максимальное число машин в пробке

Таблица 1

Maximum number of cars in a traffic jam

Table 1

Режимы работы светофора	Точки входа на перекрёсток									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Полный цикл 5 мин (75; 105; 120)	14	12	4	9	13	3	11	7	9	11
Полный цикл 3 мин (52; 62; 66)	8	6	3	5	7	2	5	4	6	5
Полный цикл 2 мин (32; 42; 46)	7	5	3	4	6	3	5	5	5	5
Увеличение времени зелёного сигнала для движения прямо на 10 с, цикл работы 1,6 мин (20; 40; 34)	4	6	4	4	9	4	4	4	3	2
Существующий режим 1,4 мин (20; 30; 34)	7	6	2	3	7	6	5	5	1	2
Полный цикл 1 мин (12; 22; 26)	4	4	2	3	4	2	2	2	4	3
Полный цикл 30 с (7; 11; 12)	3	3	1	2	3	2	2	1	3	2

По данным табл. 1 построена зависимость наибольшего числа машин в пробке перед светофором в каждой точке входа от длительности цикла работы светофора (рис. 8).

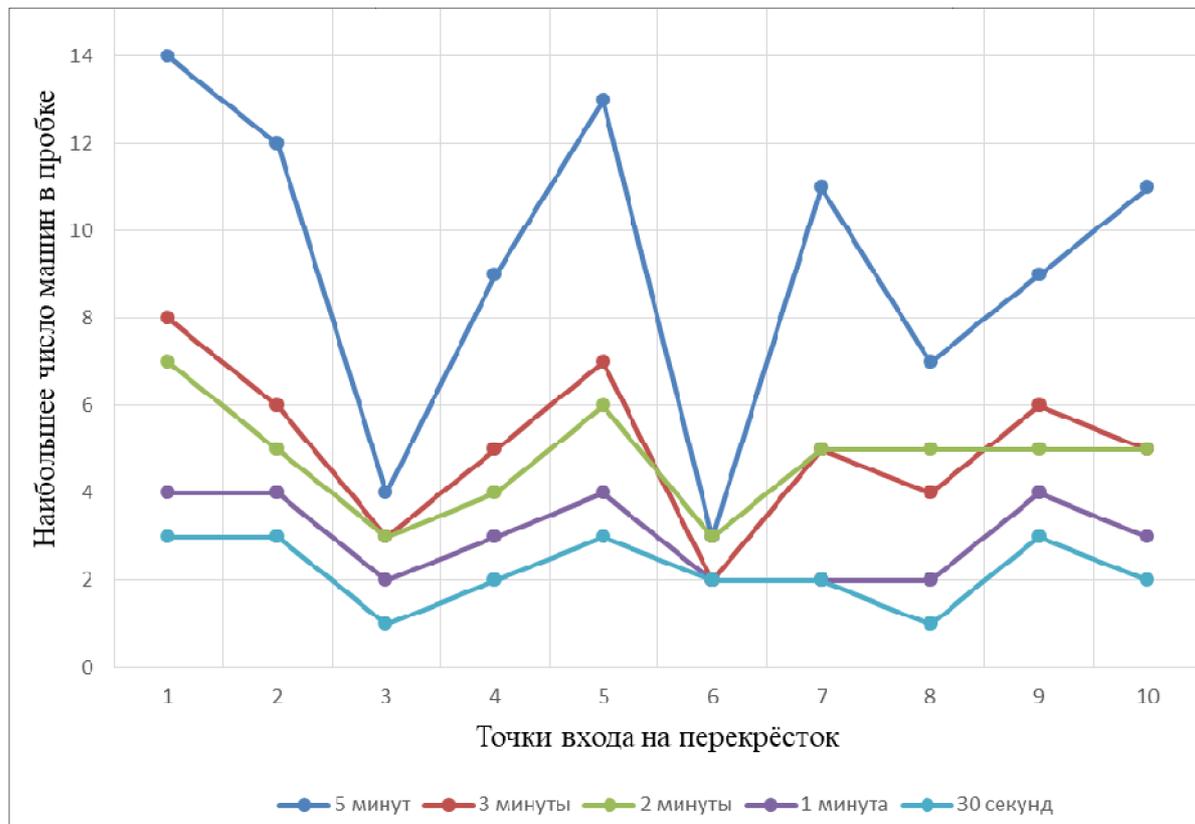


Рис. 8. Зависимость числа машин в пробке от длительности работы светофора  
Fig. 8. Dependence of the number of cars in a traffic jam on the duration of the traffic light operation

Увеличение полного цикла работы светофора практически во всех точках входа на перекресток увеличивает число ожидающих проезда автомобилей. В точках 3 и 6 (точки поворота налево) при увеличении длительности цикла работы светофора число машин в пробке увеличивается незначительно, а в точках 1, 2, 5, 7, 10 увеличение цикла работы светофора от 30 с до 5 мин значительно увеличивает число ожидающих машин (см. рис. 8).

При полном цикле 30 с наблюдаются самые малые по количеству автомобилей пробки, но при таком режиме светофора скорее всего вырастет аварийность. Кроме того, не будет возможности перейти дорогу пешеходам.

### Определение среднего времени левого поворота

При создании эксперимента для нахождения среднего времени левого поворота с вводом и без ввода специализированной левоповоротной фазы светофора использована рассмотренная ранее модель перекрестка ул. Юбилейная – ул. Свердлова (см. рис. 2). В среде AnyLogic проведено исследование зависимости среднего времени левого поворота от числа поворачивающих налево машин при отсутствии соответствующего сигнала светофора и при введении 20 с на левый поворот. Поворот осуществляется из точки 3 входа на перекресток. Время работы зелёного сигнала по ул. Юбилейной – 50 с, по ул. Свердлова – 34 с. Для исследования выбран следующий трафик: в попутном направлении по ул. Юбилейной движется 430 автомобилей в час, во встречном направлении 490 автомобилей в час. На левый поворот (на ул. Свердлова) последовательно отправляется 10, 20, 30 и 40 % машин. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Зависимость среднего времени проезда перекрестка от числа поворачивающих налево машин при встречном трафике 490 автомобилей в час**

Table 2

**The dependence of the average travel time of an intersection on the number of cars turning left in oncoming traffic is 490 vehicles per hour**

Число машин, поворачивающих налево, %	Среднее время проезда перекрестка без дополнительного режима светофора, с				Среднее время проезда перекрестка с дополнительным сигналом светофора, с			
	Точки входа на перекресток				Точки входа на перекресток			
	2	3	5	6	2	3	5	6
10	26,77	47,48	31,23	36,96	43,31	51,74	55,67	62,45
20	27,57	51,72	31,86	36,73	43,62	57,53	60,93	58,89
30	26,74	56,88	31,21	33,87	41,7	90,69	60,42	53,69
40	26,92	180,2	40,38	32,67	42,92	208,6	60,82	50,47

Время прямолинейного движения (точки 2 и 5) практически не зависит от числа поворачивающих налево машин, но при наличии третьей секции светофора оно в среднем на 20 с больше, так как к нему добавляется время запрещающего режима светофора для осуществления левого поворота. Время левого поворота встречного движения (точка 6) в обоих случаях уменьшается при увеличении числа машин, поворачивающих из точки 3, поскольку число машин, двигающихся прямо, уменьшается. При введённом дополнительном сигнале светофора это время больше в среднем на длительность дополнительного сигнала.

Среднее время проезда перекрестка из точки 3 (левый поворот) увеличивается в зависимости от числа поворачивающих машин. Причем это время больше для случая с дополнительной разрешающей секцией светофора. Графически зависимость представлена на рис. 9.

В табл. 3 показано среднее время проезда перекрестка при левом повороте из точки 3, для которого отсутствует и затем вводится левоповоротная фаза светофора. Встречный поток увеличен с 490 до 700 машин в час.

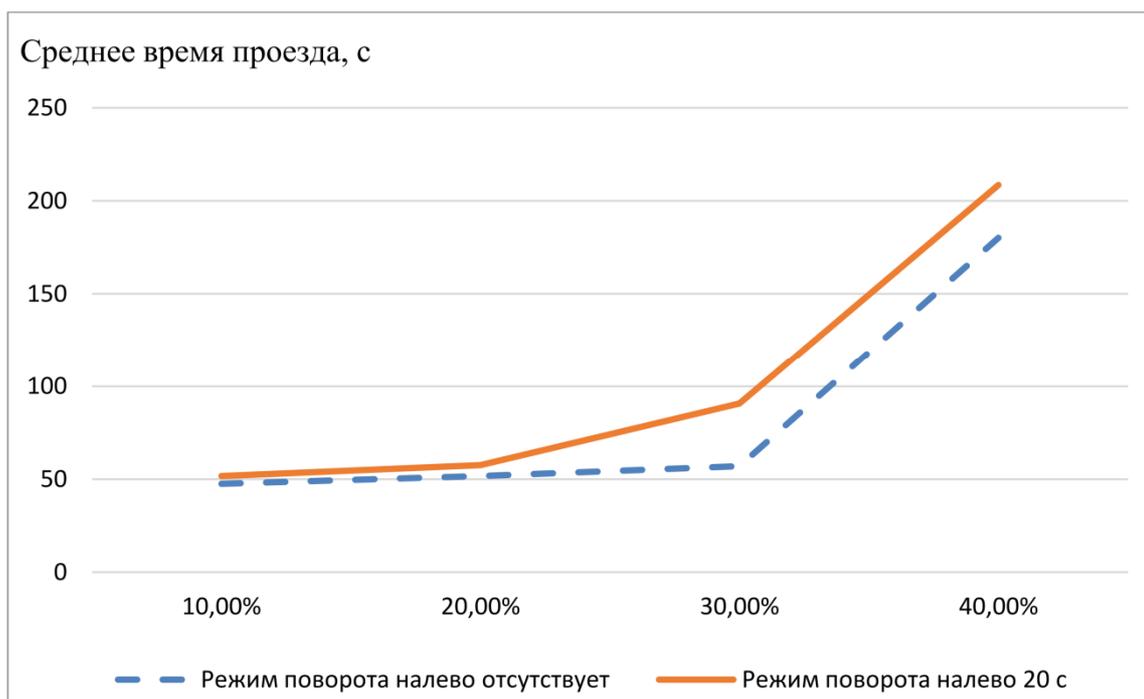


Рис. 9. Зависимость среднего времени проезда перекрёстка от числа поворачивающих налево машин при встречном трафике 490 машин в час  
Fig. 9. Dependence of the average travel time of an intersection on the number of cars turning left in oncoming traffic of 490 cars per hour

Таблица 3  
Зависимость среднего времени проезда перекрёстка от числа поворачивающих налево машин при встречном трафике 700 автомобилей в час  
Table 3  
The dependence of the average travel time of an intersection on the number of cars turning left in oncoming traffic of 700 vehicles per hour

Режим работы светофора	Число машин, поворачивающих налево, %			
	10	20	30	40
Без левоповоротной фазы, с	55,65	87,05	128,5	395,68
С левоповоротной фазой 20 с, с	53,39	57,5	92,66	202,1

Здесь наблюдается противоположная ситуация: при увеличении интенсивности встречного движения до 700 автомобилей в час среднее время левого поворота без выделенного сигнала светофора резко возрастает с увеличением числа поворачивающих налево машин по сравнению с поворотом с выделенной фазой светофора. Так, при повороте 43 автомобилей в час (10 % поворачивающих машин) это время в 1,04 раза больше, чем при выделенном сигнале светофора, при повороте 86 автомобилей в час (20 % поворачивающих машин) – в 1,5 раза больше, при повороте 172 автомобилей в час (40 % поворачивающих машин) время проезда увеличивается в 1,9 раза.

Графически зависимость представлена на рис. 10.

Введение третьей левоповоротной фазы светофора в этом случае необходимо: при увеличении интенсивности потока время просачивания уменьшается, завершить поворот зачастую удаётся только тогда, когда желтый сигнал светофора прерывает прямолинейное движение автомобилей во встречном направлении. За этот короткий промежуток времени повернуть успевают не все машины. Третья фаза светофора увеличивает время поворота.

Для перекрёстка ул. Юбилейная – ул. Свердлова в г. Березники дополнительный сигнал светофора увеличивает время ожидания проезда. Но введение левоповоротного сигнала светофора снижает аварийность, облегчает поворот, поэтому его введение целесообразно.

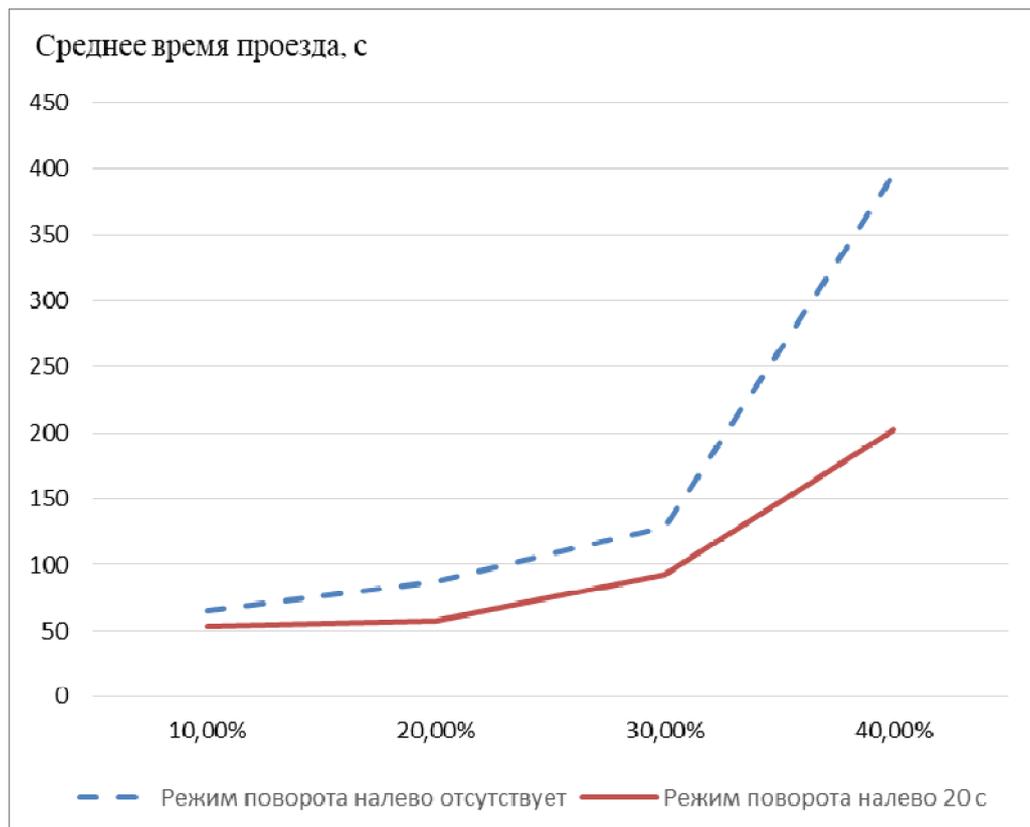


Рис. 10. Зависимость среднего времени проезда перекрёстка от числа поворачивающих налево машин при встречном трафике 700 машин в час

Fig. 10. Dependence of the average travel time of an intersection on the number of cars turning left in oncoming traffic of 700 cars per hour

### Заключение

Моделирование транспортных потоков на перекрёстке улиц Юбилейная – Свердлова в г. Березники Пермского края показало:

1) увеличение длительности цикла работы светофора до 5 мин увеличивает число машин в пробке в 2–3 раза, уменьшение длительности циклов работы светофора до 30 с уменьшает пробки по сравнению с пятиминутным циклом, но при этом нет возможности перейти дорогу пешеходам;

2) ввод специализированной левоповоротной фазы светофора при встречном трафике 490 автомобилей в час повышает время проезда светофора;

3) при встречном трафике 700 автомобилей в час время проезда перекрёстка без дополнительной секции светофора больше, чем при введённом дополнительном сигнале.

Важным частным результатом исследования является проверка возможности моделирования подобных ситуаций в AnyLogic с последующей оценкой адекватности полученных результатов. Нарботан опыт, позволяющий по необходимости уточнить эту модель или идентифицировать параметры модели дорожной сети какого-то города и решить задачу уменьшения очередей на перекрестках в пределах возможного.

Результаты произведенной работы дают возможность обоснованно предполагать, что при наличии заинтересованности у городской власти или инспекции по безопасности дорожного движения вполне реально произвести более масштабные измерения потоков в разное время дня и года и получить работоспособную модель, позволяющую оптимизировать настройки светофоров: устанавливать разные настройки в разные интервалы времени, в разные дни недели, либо переключаться между настройками, ведущими к оптимизации различных критериев, по команде из диспетчерской системы города. При очевидной бесперспективности продвижения систем мониторинга реального времени в большинстве городов РФ, не располагающих свободными бюджетами для их создания, это представляется нам единственным способом улучшения дорожного

движения в смысле увеличения пропускной способности улично-дорожной сети, предотвращения автомобильных заторов, уменьшения задержек в движении транспорта, в значит, в итоге – повышения безопасности дорожного движения. Пока же подобная заинтересованность не возникает. Однако это не мешает авторам констатировать, что в инициативном порядке они к таковой подготовились в достаточной мере.

### Список литературы

1. Тун Мин У, Лупин С.А. Сравнение результатов аналитического расчёта и имитационного моделирования транспортных систем // *International Journal of Open Information Technologies*. 2024. Vol. 12, no. 5. P. 103–108.
2. Сравнение систем структурного и имитационного моделирования Stratum 2000, Simulink, AnyLogic / В.В. Мокшин, А.П. Кирпичников, Д.Н. Маряшина и др. // *Вестник технологического университета*. 2019. Т. 22, № 4. С. 144–148.
3. Цзянг Хайянь. Моделирование передвижения транспортных средств на основе макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2022, Т. 16, №2. С. 22-28. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-2-22-28
4. Daganzo C.F. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2007. Vol. 41, iss. 1. P. 49–62. DOI: 10.1016/j.trb.2006.03.001
5. Холодов Ю.В., Норов А.С. Анализ развития автомобильной пробки с использованием основной транспортной диаграммы // *Вестник ВГАВТ*. 2013. Вып. 37. С. 117–124.
6. Разработка имитационной дискретно-событийной модели транспортной инфраструктуры с использованием инструментов оптимизации / Д.В. Кузьмин, В.В. Багинова, Д.А. Краснобаев, Д.В. Мусатов // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2023. Т. 17, № 2. С. 42–48. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-17-2-42-48
7. Оптимизация времени проезда перекрестков в среде имитационного моделирования AnyLogic / П.С. Медведев, А.Т. Садыкова, Г.Л. Нуруллина, А.Л. Нуруллина // *Перспективные информационные технологии (ПИТ 2019): тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Самара, 24–26 июня 2019 года)*. Самара: Самарский научный центр РАН, 2019. С. 605–609.
8. Андронов С.А. Разработка и исследование имитационной модели светофорного регулирования на основе нечеткой логики в среде AnyLogic // *Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2015): тр. VII Всерос. науч.-практ. конф. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2015. Т. 2. С. 443–449.*
9. Евтушенко А.Е. Исследование работы перекрестка на микроуровне с использованием средств оптимизации в среде AnyLogic // *Системный анализ и логистика*. 2020. № 3 (25). С. 41–51. DOI: 10.31799/2007-5687-2020-3-41-51
10. Компьютерное моделирование проблемного перекрестка в среде AnyLogic / А.В. Ли, В.С. Репкин, Г.Ю. Семенов и др. // *Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика*. 2023. Т. 1, № 2. С. 1–10. DOI: 10.18799/29495407/2023/2/16
11. Реенко Н.А., Михайлов А.С. Разработка имитационной модели дорожного движения в программной среде AnyLogic // *Решетневские чтения: материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. (Красноярск, 12–16 ноября 2018 года)*. Красноярск: СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева, 2018. Т. 2. С. 153–155.
12. Соловьев Н.А., Павлов А.Д. Разработка имитационной модели дорожного движения в программной среде AnyLogic // *Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): сб. тр. одиннадцатой всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (Казань, 18–20 октября 2023 года)*. Казань: Изд-во АН РТ, 2023. С. 711–717.
13. Панькина К.Е. Модель анализа эффективности работы регулируемого перекрестка при просачивании транспортных средств сквозь встречный поток // *Логистика и управление цепями поставок*. 2023, Т. 20, № 1 (106). С. 68–74.
14. Анализ процесса ввода специализированной левоповоротной фазы регулирования / С.В. Дорохин, Д.В. Лихачев, С.А. Богданов, А.В. Сорокин // *Воронежский научно-технический вестник*. 2020. Т. 4, № 4 (34). С. 51–63. DOI: 10.34220/2311-8873-2021-4-4-51-63

15. Ерицян Г.С. О пропуске левоповоротных транспортных потоков на регулируемом перекрестке // Вестник Национального политехнического университета Армении. Механика, машиноведение, машиностроение. 2020. № 1. С. 95–101.

### References

1. Tun Min Oo, Lupin S.A. Analytical calculations in comparison with simulation modeling of transport systems. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024;12(5):103–108. (In Russ.)

2. Mokshin V.V., Kirpichnikov A.P., Maryashina D.N., Stadnik N.A., Zolotukin A.V. Comparing structural and simulation modelling systems: Stratum 2000, Simulink, and Anylogic. *Herald of Technological University*. 2019;22(4):144–148. (In Russ.)

3. Jiang Haiyan. Modeling the movement of vehicles based on a macroscopic fundamental diagram of the traffic flow. *T-Comm*. 2022;16(2):22–28. (In Russ.) DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-2-22-28

4. Daganzo C.F. Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2007;41(1):49–62. DOI: 10.1016/j.trb.2006.03.001

5. Holodov Y.V., Norev A.S. Analysis of the development of the traffic jams with the use of the basic transport chart. *Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*. 2013;37:117–124. (In Russ.)

6. Kuzmin D.V., Baginova V.V., Krasnobaev D.A., Musatov D.V. Development of a discrete-event simulation model of transport infrastructure using optimization tools. *T-Comm*. 2023;17(2):42–48. (In Russ.) DOI: 10.36724/2072-8735-2022-17-2-42-48

7. Medvedev P.S., Sadykova A.T., Nurullina G.L., Nurullina A.L. [Optimization of crossing time in the AnyLogic simulation environment]. In: *Promising Information Technologies (PIT 2019): proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Samara, June 24–26, 2019*. Samara: Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2019. P. 605–609. (In Russ.)

8. Andronov S.A. [Development and research of a simulation model of traffic light regulation based on fuzzy logic in the AnyLogic environment]. In: *Simulation modeling. Theory and Practice (IMMOD-2015): proceedings of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference*. Moscow: Publishing House of IPU RAS; 2015. Vol. 2. P. 443–449. (In Russ.)

9. Evtushenko A.E. Research of the intersection operation at the micro level using optimization tools in the AnyLogic environment. *Systems Analysis and Logistics*. 2020;3(25):41–51. (In Russ.) DOI: 10.31799/2007-5687-2020-3-41-51

10. Li A.V., Repkin V.S., Semenov G.Yu., Sermavkin N.I., Faerman V.A. Computer simulation of a problem crossroad in the anylogic environment. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Industrial cybernetics*. 2023;1(2):1–10. (In Russ.) DOI: 10.18799/29495407/2023/2/16

11. Reenko N.A., Mikhaylov A.S. Development of the imitation model of road traffic in the AnyLogic software. In: *Reshetnev Readings: Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference (Krasnoyarsk, November 12–16, 2018)*. Krasnoyarsk: Reshetnev University; 2018. Vol. 2. P. 153–155. (In Russ.)

12. Solovyov N.A., Pavlov A.D. Development of a traffic simulation model in the AnyLogic software environment. In: *Simulation modeling. Theory and Practice (IMMOD-2023): Proceedings of the eleventh All-Russian Scientific and Practical conference on simulation modeling and its application in science and industry (Kazan, October 18–20, 2023)*. Kazan: Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; 2023. P. 711–717. (In Russ.)

13. Pankina K.E. A model for analyzing the efficiency of a regulated intersection when vehicles leak through oncoming traffic. *Logistics and Supply Chain Management*. 2023;20(1(106)):68–74. (In Russ.)

14. Dorokhin S.V., Likhachev D.V., Bogdanov S.A., Sorokin A.V. Analysis of the process of entering a specialized left-steering phase regulation. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2020;4(4(34)):51–63. (In Russ.) DOI: 10.34220/2311-8873-2021-4-4-51-63

15. Yeritsyan G.S. The pass of left turn traffic flow in regulated intersections. *Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Mechanics, Machine Science, Machine-Building*. 2020;(1):95–101. (In Russ.)

***Информация об авторах***

**Володина Юлия Игоревна**, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; julia\_volodina@mail.ru.

**Сергеев Никита Олегович**, магистрант кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; nikitosserg5@gmail.com.

**Затонский Андрей Владимирович**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; zxenon@narod.ru.

***Information about the authors***

**Julia I. Volodina**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; julia\_volodina@mail.ru.

**Nikita O. Sergeev**, Master's student of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; nikitosserg5@gmail.com.

**Andrey V. Zatonkiy**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; zxenon@narod.ru.

***Вклад авторов:*** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***Contribution of the authors:*** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

***Статья поступила в редакцию 13.02.2025***

***The article was submitted 13.02.2025***

# Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья  
УДК 681.5  
DOI: 10.14529/ctcr250203

## ВЫПИСЫВАНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ МАТРИЦ ШАРНИРНЫХ ДРЕВОВИДНЫХ СИСТЕМ

**А.И. Телегин**, [teleginai@susu.ru](mailto:teleginai@susu.ru)

Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе,  
Миасс, Россия

**Аннотация.** Целью является разработка формализма (последовательности формальных действий) выписывания формул вычисления элементов матрицы инерционных коэффициентов (ЭМИК) древовидных систем тел с открытыми ветвями (ДСТОВ), тела которых образуют между собой шарниры, т. е. вращательные кинематические пары пятого класса. **Методы исследования** относятся к механике систем тел, системному анализу и робототехнике. **Результаты исследования** содержат новый формализм автоматического выписывания формул вычисления ЭМИК, т. е. коэффициентов при произведениях относительных угловых скоростей тел в выражении кинетической энергии ДСТОВ. Формулы ЭМИК содержат постоянные структурные, геометрические и инерционные параметры рассматриваемой ДСТОВ. Эти формулы представляются в виде квадратичных форм относительно направляющих косинусов между осями систем координат, жестко связанных с телами. Эффективность формализма демонстрируется на примерах ручного выписывания ЭМИК трехзвеного ангулярного манипуляционного робота (МР) в вертикальной плоскости, двуруких МР с пятью и семью степенями свободы на плоскости и в пространстве. Для МР в пространстве решена задача синтеза его параметров, для которых ЭМИК не зависят от углов поворота тел. **Заключение.** Предлагаемый формализм можно использовать для выписывания ЭМИК типовых ангулярных МР, а также шагающих аппаратов в одноопорной фазе ходьбы или полета, например, с целью вывода на их основе уравнений динамики в форме уравнения Лагранжа второго рода. Применение известных методов учета связей расширяет область использования ЭМИК на ДСТВ, т. е. на ДСТОВ со связями концевых тел, а также на ДСТВ с переменной структурой, что актуально для выписывания уравнений динамики шагающих аппаратов и машин в различных фазах ходьбы.

**Ключевые слова:** древовидные системы тел, кинетическая энергия, матрица инерционных коэффициентов, выписывание формул, направляющие косинусы, манипуляционные роботы

**Для цитирования:** Телегин А.И. Выписывание инерционных матриц шарнирных древовидных систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 33–45. DOI: 10.14529/ctcr250203

Original article  
DOI: 10.14529/ctcr250203

## WRITING OUT INERTIAL MATRICES OF HINGED TREE-SHAPED SYSTEMS

**A.I. Telegin**, [teleginai@susu.ru](mailto:teleginai@susu.ru)

South Ural State University, Miass, Russia

**Abstract.** The goal is to develop a formalism (a sequence of formal actions) for deriving formulas for calculating the Elements of the Matrix of Inertial Coefficients (EMIC) of Tree-Like Systems with Open Branches (TSOB), whose bodies form hinges between each other, i. e., rotational kinematic pairs of the fifth class. **Research methods** relate to mechanics of systems of bodies, system analysis, and robotics. **The results of the study** contain a new formalism for automatically deriving EMIC calculation formulas, i. e., coef-

ficients in the products of relative angular velocities of bodies in the expression of kinetic energy of TSOB. EMIC formulas include constant structural, geometric, and inertial parameters of the considered TSOB. These formulas are represented as quadratic forms with respect to the direction cosines between the axes of coordinate systems rigidly connected to the bodies. The effectiveness of the formalism is demonstrated by examples of manual derivation of EMICs for a three-link angular Manipulator Robot (MR) in the vertical plane, two-armed MRs with five and seven degrees of freedom on the plane and in space. For an MR in space, the problem of synthesizing its parameters, for which EMICs do not depend on body rotation angles, has been solved. **Conclusion.** The proposed formalism can be used to derive EMICs for typical angular MRs, as well as walking devices in single-support phase of walking or flight, e. g., to derive dynamic equations based on them in the form of Lagrange's second-order equation. Applying known methods of constraint accounting expands the use of EMICs to TSDB, i. e., to TSOBs with end-body constraints, as well as to TSDBs with variable structure, which is relevant for deriving dynamic equations for walking machines and apparatuses in different phases of motion.

**Keywords:** tree body systems, kinetic energy, inertial coefficient matrix, formula writing, directional cosines, manipulation robots

**For citation:** Telegin A.I. Writing out inertial matrices of hinged tree-shaped systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2025;25(2):33–45. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250203

## Введение

ЭМИК являются коэффициентами при произведениях обобщенных скоростей в выражении кинетической энергии системы тел. Они используются для решения различных задач динамики, управления и синтеза систем тел с заданными свойствами [1–4]. Вывод ЭМИК со многими подвижными телами является сложным и громоздким процессом [5, 6]. Поэтому автоматизация процесса вывода формул вычисления ЭМИК в явном аналитическом виде с минимальным числом арифметических операций (сложений и умножений) является актуальной задачей. Особый интерес представляют формализмы выписывания ЭМИК. Под формализмом выписывания понимается последовательность формальных действий конкретизации общих формул к виду, который соответствует рассматриваемой конкретной системе тел. Поиск простых формализмов выписывания уравнений математических моделей систем тел лежит на пути рассмотрения их классов и отдельных этапов (подпроцессов) вывода формул. Например, шарнирные системы тел охватывают многие ангулярные МР [7, 8], а также двуногие шагающие аппараты [9, 10] и шагающие машины, имеющие 4, 6 и более ног [11, 12]. Вывод уравнений Лагранжа 2-го рода состоит из трех этапов [13, 14]. На первом выводится выражение Лагранжиана, т. е. разность кинетической и потенциальной энергий. На втором этапе вычисляются частные производные от Лагранжиана по обобщенным координатам и скоростям. На третьем этапе вычисляются производные по времени от выражений частных производных по каждой обобщенной скорости. Для систем тел с тремя и более телами каждый из этих этапов требует громоздкой вычислительной работы [5]. Поэтому автоматизация этих процессов является актуальной задачей. Важно также, во-первых, представлять выведенные выражения в оптимальном виде, т. е. содержащем минимальное число арифметических операций. Во-вторых, в конечных выражениях уравнений динамики желательно в явном виде представить центробежные и Кориолисовы инерционные силы, а также выделить из них гироскопические составляющие. Последняя задача решена в статье [15], в которой выражения ЭМИК считались известными. В настоящей статье этот недостаток для рассматриваемых ДСТОВ устранен.

**Постановка задачи.** Для шарнирных ДСТОВ разработать формализм выписывания оптимальных (в смысле минимума арифметических операций) формул вычисления ЭМИК, имеющих аналитический вид с явно выраженными структурными, кинематическими и массо-инерционными параметрами.

## 1. Используемые понятия и обозначения

Неподвижное тело, образующее шарнир с телом ДСТОВ, назовем основанием (станиной, стойкой, опорой, землей). От каждого выбранного тела ДСТОВ существует единственный путь (последовательность шарнирно связанных тел) до основания. Тела этого пути назовем несущими

для выбранного тела. Каждое тело имеет единственное базовое тело (базу), т. е. первое тело на пути к основанию. Поворот тела относительно своей базы называют относительным. Точка, выбранная на оси относительного поворота тела, называется полюсом этого тела. Множество тел, от которых путь до основания проходит через выбранное тело, назовем несомыми телами для выбранного тела. Тело вместе со своими несомыми телами назовем подсистемой. Множество тел, для которых базой является выбранное тело, назовем смежными телами для выбранного тела. Если для выбранного тела в полюсах его смежных тел мысленно разместить массы их подсистем, то получим дополненное тело (ДТ). Условимся различать тела по их номерам. Если после аббревиатуры в круглых скобках записано натуральное число или его обозначение, т. е. буква  $i, j$  или  $k$ , то это номер тела.

В общих формулах выписывания ЭМИК используются следующие обозначения:  $N$  – количество подвижных тел и номер последнего тела;  $m_{oi}$  – масса и обозначение тела с номером  $i$ ;  $m_i$  – масса и обозначение  $i$ -й подсистемы;  $q_i$  – угол относительного поворота тела  $m_{oi}$ ;  $\mathbf{q}_i$  – орт оси относительного вращения тела  $m_{oi}$ ;  $O_i$  – полюс тела  $m_{oi}$ ; СКТ – система координат тела, т. е. система координат, жестко связанная с телом;  $O_i \mathbf{x}_i \mathbf{y}_i \mathbf{z}_i$  – правая СКТ( $i$ );  $L_i = O_{i-1} O_i \geq 0$  –  $i$ -е межполюсное расстояние;  $\mathbf{e}_i = O_{i-1} O_i / L_i$  –  $i$ -й межполюсный орт, направленный из полюса  $O_{i-1}$  в полюс  $O_i$ ;  $C_i$  – центр масс тела  $m_{oi}$  (ЦМ( $i$ ));  $S_i$  – множество номеров тел, смежных телу  $m_{oi}$ ; ДТ( $i$ ) – тело  $m_{oi}$ , дополненное массами  $m_j$ , мысленно сосредоточенными в полюсах  $O_j$ , где  $j \in S_i$ ;  $C_{di}$  – ЦМ ДТ( $i$ );  $\mathbf{m}_i$  – статический момент подсистемы  $m_i$  относительно полюса  $O_i$ ;  $I_i^x$  – момент инерции тела  $m_{oi}$  относительно оси  $O_i \mathbf{x}_i$ ;  $I_i^y$  – момент инерции тела  $m_{oi}$  относительно оси  $O_i \mathbf{y}_i$ ;  $I_i^z$  – момент инерции тела  $m_{oi}$  относительно оси  $O_i \mathbf{z}_i$ ;  $I_i^{xy}$ ,  $I_i^{xz}$ ,  $I_i^{yz}$  – центробежные моменты инерции тела  $m_{oi}$ ;  $x_{ji}^q = \mathbf{x}_j \cdot \mathbf{q}_i$ ,  $y_{ji}^q = \mathbf{y}_j \cdot \mathbf{q}_i$ ,  $z_{ji}^q = \mathbf{z}_j \cdot \mathbf{q}_i$  – направляющие косинусы (НК) орта  $\mathbf{q}_i$  в СКТ( $j$ );  $q_{ji}^q = \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{q}_i$ ,  $e_{ji}^q = \mathbf{e}_j \cdot \mathbf{q}_i$ ,  $x_{ji}^x = \mathbf{x}_j \cdot \mathbf{x}_i$ ,  $x_{ji}^y = \mathbf{x}_j \cdot \mathbf{y}_i$ , ...,  $z_{ji}^z = \mathbf{z}_j \cdot \mathbf{z}_i$ ,  $x_{ji}^e = \mathbf{x}_j \cdot \mathbf{e}_i$ ,  $y_{ji}^e = \mathbf{y}_j \cdot \mathbf{e}_i$ ,  $z_{ji}^e = \mathbf{z}_j \cdot \mathbf{e}_i$ ,  $m_{ji}^e = \mathbf{m}_j \cdot \mathbf{e}_i$  – проекция вектора  $\mathbf{m}_j$  на ось  $O_i \mathbf{e}_i$ .

В формулах выписывания ЭМИК используются следующие знаки суммирования на древовидных структурах данных (на деревьях) [5]:

$\sum_{j \in S_i} f_j$  – знак суммирования величины  $f_j$  по номерам тел, смежных телу  $m_{oi}$ ;

$\sum_{j \in \bar{n}_i} f_j$  – знак суммирования величины  $f_j$  по номерам тел подсистемы  $m_i$ ;

$\sum_{j \in n_i} f_j = \sum_{j \in \bar{n}_i} f_j - f_i$ ;

$\sum_{j,i+1}^k f_j$  – знак суммирования величины  $f_j$  по номерам тел, несущих тело  $m_{ok}$ , начиная от тела  $m_{oi+1}$  и заканчивая телом  $m_{ok}$ ;

Из утверждения 5 учебного пособия [5] следует, что координаты ЦМ ДТ( $i$ ) в СКТ( $i$ ) вычисляются по формулам:

$$d_{xi} = m_{oi} x_{ci} + \sum_{j \in S_i} m_j L_j e_{ji}^x, \quad d_{yi} = m_{oi} y_{ci} + \sum_{j \in S_i} m_j L_j e_{ji}^y, \quad d_{zi} = m_{oi} z_{ci} + \sum_{j \in S_i} m_j L_j e_{ji}^z, \quad (1)$$

где  $x_{ci}$ ,  $y_{ci}$ ,  $z_{ci}$  – координаты ЦМ( $i$ ) в СКТ( $i$ );  $e_{ji}^x$ ,  $e_{ji}^y$ ,  $e_{ji}^z$  – проекции орта  $\bar{\mathbf{e}}_j$  на оси СКТ( $i$ ).

## 2. Общие формулы выписывания ЭМИК

В общих формулах выписывания ЭМИК используется обозначение

$$J_{kji} = I_k^x x_{kj}^q x_{ki}^q + I_k^y y_{kj}^q y_{ki}^q + I_k^z z_{kj}^q z_{ki}^q - I_k^{xy} (x_{kj}^q y_{ki}^q + y_{kj}^q x_{ki}^q) - I_k^{xz} (x_{kj}^q z_{ki}^q + z_{kj}^q x_{ki}^q) - I_k^{yz} (y_{kj}^q z_{ki}^q + z_{kj}^q y_{ki}^q).$$

В процессе практического использования обратной рекуррентной формулы (ОРФ) типа  $a_i = b_i + \sum_{j \in S_i} (d_j + a_j)$ , где  $b_i$ ,  $d_j$  – обозначения произвольных выражений, следует менять индекс  $i$ , начиная с концевых тел ДСТОВ, и если  $m_{ok}$  – концевое тело, то  $S_k$  – пустое множество, т. е.  $a_k = b_k$ .

Утверждение 1. ЭМИК ДСТОВ можно выписывать по формуле

$$H_{ji} = J_{ji}^s + J_j^o q_{ji}^q + \sum_{k,i+1}^j L_k (q_{ji}^q m_{jk}^e - m_{ji}^q q_{jk}^e) - \sum_{k \in n_j} L_k [e_{kj}^q (m_k L_k e_{ki}^q + m_{ki}^q) + e_{ki}^q m_{kj}^q], \quad (2)$$

где  $1 \leq i \leq j \leq N$ ,  $J_{ji}^s = \sum_{k \in \bar{n}_j} J_{kji}$ . Справедлива ОРФ

$$J_i^o = \sum_{j \in S_i} (m_j L_j^2 + 2L_j m_{jj}^e + J_j^o), \quad (3)$$

и для любого символа  $\xi$ , принимающего значение из множества символов  $\{q, e, x, y, z\}$ , имеет место ОРФ

$$m_{ji}^\xi = d_{xj}x_{ji}^\xi + d_{yj}y_{ji}^\xi + d_{zj}z_{ji}^\xi + \sum_{k \in S_j} m_{ki}^\xi. \quad (4)$$

Диагональные ЭМИК выписываются по формуле

$$H_{ii} = J_i^s + J_i^o - \sum_{j \in n_i} L_j e_{ji}^q (m_j L_j e_{ji}^q + 2m_{ji}^q), \quad (5)$$

где  $1 \leq i \leq N$  и с учетом обозначений  $I_{zj}^x = I_j^x - I_j^z$ ,  $I_{zj}^y = I_j^y - I_j^z$ ,

$$J_i^s = \sum_{j \in \bar{n}_i} [I_j^z + I_{zj}^x x_{ji}^{q2} + I_{zj}^y y_{ji}^{q2} - 2(I_j^{xy} x_{ji}^q y_{ji}^q + I_j^{xz} x_{ji}^q z_{ji}^q + I_j^{yz} y_{ji}^q z_{ji}^q)]. \quad (6)$$

*Доказательство.* С учетом обозначений

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_k &= \mathbf{O}_{k-1} \mathbf{O}_k = L_k \mathbf{e}_k, \quad \mathbf{R}_{ij} = \mathbf{O}_i \mathbf{O}_j = \sum_{k=i+1}^j \mathbf{R}_k, \\ R_{ki}^q &= \mathbf{R}_k \cdot \mathbf{q}_i = L_k \mathbf{e}_k \cdot \mathbf{q}_i = L_k e_{ki}^q, \quad m_{ji}^q = \mathbf{m}_j \cdot \mathbf{q}_i, \quad m_{jk}^e = \mathbf{m}_j \cdot \mathbf{e}_k \end{aligned}$$

из формулы (2) утверждения 16 учебного пособия [5] следует, что для ДСТОВ ЭМИК вычисляются по формуле

$$\begin{aligned} H_{ji} &= J_{ji}^s + \mathbf{q}_i \cdot (\mathbf{q}_j \mathbf{m}_j - \mathbf{m}_j \mathbf{q}_j) \cdot \mathbf{R}_{ij} + \sum_{k \in n_j} [m_k (R_k^2 \mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_j - R_{kj}^q R_{ki}^q) + \\ &+ (2\mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_j \mathbf{R}_k - R_{kj}^q \mathbf{q}_i - R_{ki}^q \mathbf{q}_j) \cdot \mathbf{m}_k] = J_{ji}^s + \sum_{k=i+1}^j (q_{ji}^q \mathbf{m}_j \cdot \mathbf{R}_k - m_{ji}^q \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{R}_k) + \\ &+ \sum_{k \in n_j} [m_k L_k^2 (q_{ji}^q - e_{kj}^q e_{ki}^q) + L_k (2q_{ji}^q m_{kk}^e - e_{kj}^q m_{ki}^q - e_{ki}^q m_{kj}^q)] = \\ &= J_{ji}^s + \sum_{k=i+1}^j L_k (q_{ji}^q m_{jk}^e - m_{ji}^q e_{kj}^q) + \sum_{k \in n_j} [L_k q_{ji}^q (m_k L_k + 2m_{kk}^e) - \\ &- L_k (m_k L_k e_{kj}^q e_{ki}^q + e_{kj}^q m_{ki}^q + e_{ki}^q m_{kj}^q)], \end{aligned}$$

где  $1 \leq i \leq j \leq N$ . Отсюда, используя обозначение  $J_j^o = \sum_{k \in n_j} (m_k L_k^2 + 2L_k m_{kk}^e)$  и формулу (5) раздела 3 учебного пособия [5], получим ОРФ (3) и искомую формулу (2).

Используя формулу (1) из формулы (11) утверждения 5 учебного пособия [5], получим ОРФ (4).

Диагональные ЭМИК выписываются по формуле (2) в случае  $j = i$ , которая с учетом равенства  $q_{ii}^q = 1$  принимает искомый вид (5).

Из обозначения  $J_{kji}$  в случае  $i = j$  получим

$$J_{kjj} = I_k^x x_{kj}^{q2} + I_k^y y_{kj}^{q2} + I_k^z z_{kj}^{q2} - 2(I_k^{xy} x_{kj}^q y_{kj}^q + I_k^{xz} x_{kj}^q z_{kj}^q + I_k^{yz} y_{kj}^q z_{kj}^q).$$

Отсюда с учетом тождества  $x_{ji}^{q2} + y_{ji}^{q2} + z_{ji}^{q2} = q_{ij}^{x2} + q_{ij}^{y2} + q_{ij}^{z2} = 1$  получим  $z_{ji}^{q2} = 1 - x_{ji}^{q2} - y_{ji}^{q2}$ . Следовательно, используя обозначение  $J_{ji}^c = 2(I_j^{xy} x_{ji}^q y_{ji}^q + I_j^{xz} x_{ji}^q z_{ji}^q + I_j^{yz} y_{ji}^q z_{ji}^q)$ , получим

$$\begin{aligned} J_i^s &= J_{ii}^s = \sum_{j \in \bar{n}_i} J_{jii} = \sum_{j \in \bar{n}_i} (I_j^x x_{ji}^{q2} + I_j^y y_{ji}^{q2} + I_j^z z_{ji}^{q2} - J_{ji}^c) = \\ &= \sum_{j \in \bar{n}_i} [I_j^x x_{ji}^{q2} + I_j^y y_{ji}^{q2} + I_j^z (1 - x_{ji}^{q2} - y_{ji}^{q2}) - J_{ji}^c] = \sum_{j \in \bar{n}_i} (I_j^z + I_{zj}^x x_{ji}^{q2} + I_{zj}^y y_{ji}^{q2} - J_{ji}^c), \end{aligned}$$

что доказывает формулу (6). *Утверждение доказано.*

Если у ДСТОВ оси вращения соседних тел параллельны, то для выписывания поддиагональных ЭМИК рекомендуем использовать

*Утверждение 2.* Если  $\mathbf{q}_{i-1} = \mathbf{q}_i$ , то

$$H_{j,i-1} = H_{ji} + L_i (q_{ji}^q m_{ji}^e - q_{ji}^e m_{ji}^q). \quad (7)$$

*Доказательство.* Если  $\mathbf{q}_{i-1} = \mathbf{q}_i$ , то  $q_{ji-1}^q = q_{ji}^q$ ,  $m_{ji-1}^q = m_{ji}^q$ ,  $e_{ji-1}^q = e_{ji}^q$  и по формуле (2) имеем

$$\begin{aligned} H_{j,i-1} &= J_{j,i-1}^s + J_j^o q_{ji}^q + \sum_{k,i} L_k (q_{ji}^q m_{jk}^e - m_{ji}^q q_{jk}^e) - \sum_{k \in n_j} L_k [e_{kj}^q (m_k L_k e_{ki}^q + m_{ki}^q) + e_{ki}^q m_{kj}^q] = \\ &= J_{j,i-1}^s + H_{ji} - J_{ji}^s + L_i (q_{ji}^q m_{ji}^e - m_{ji}^q q_{ji}^e). \end{aligned}$$

Если  $\mathbf{q}_{i-1} = \mathbf{q}_i$ , то  $x_{ki-1}^q = x_{ki}^q$ ,  $y_{ki-1}^q = y_{ki}^q$ ,  $z_{ki-1}^q = z_{ki}^q$  и, следовательно,  $J_{kji-1} = J_{kji}$ . Тогда  $J_{j,i-1}^s - J_{ji}^s = 0$  и последнее выражение  $H_{j,i-1}$  принимает искомый вид (7). *Утверждение доказано.*

Известны классы ДСТОВ, в которых для некоторых тел орты осей вращения всех их смежных тел совпадают с ортом оси вращения базового тела. Например, к таким ДСТОВ относятся некоторые многорукие МР, а также шагающие машины. Для систем тел на плоскости все тела имеют это свойство. Для таких систем тел рекомендуем использовать

Утверждение 3. Если  $\mathbf{q}_i = \mathbf{q}_j$ , где  $j \in S_i$ , то

$$H_{ii} = I_i^d + \sum_{j \in S_i} [H_{jj} + 2L_j(m_{jj}^e - e_{jj}^q m_{jj}^q)], \quad (8)$$

где  $I_i^d = J_{iii} + \sum_{j \in S_i} m_j L_j^2 (1 - e_{jj}^{q2}) = \text{const}$ .

Доказательство. На деревьях имеет место очевидная формула [5]

$$\sum_{j \in n_i} a_{ji} = \sum_{k \in S_i} \sum_{j \in \bar{n}_k} a_{ji}, \quad (9)$$

где  $a_{ji}$  – произвольное слагаемое. Если  $a_{ji} = L_j e_{ji}^q (m_j L_j e_{ji}^q + 2m_{ji}^q)$  и  $\mathbf{q}_i = \mathbf{q}_k$  для  $k \in S_i$ , то  $a_{ji} = a_{jk}$  и формула (5) представима в виде

$$\begin{aligned} H_{ii} &= J_i^s + J_i^o - \sum_{j \in n_i} a_{ji} = J_i^s + J_i^o - \sum_{k \in S_i} \sum_{j \in \bar{n}_k} a_{jk} = J_i^s + J_i^o - \sum_{k \in S_i} (a_{kk} + \sum_{j \in n_k} a_{jk}) = \\ &= J_i^s + J_i^o - \sum_{k \in S_i} a_{kk} + \sum_{k \in S_i} (-J_k^s - J_k^o + J_k^s + J_k^o - \sum_{j \in n_k} a_{jk}) = \\ &= J_i^s + J_i^o - \sum_{k \in S_i} (a_{kk} + J_k^s + J_k^o) + \sum_{k \in S_i} H_{kk}. \end{aligned}$$

По обозначениям величин  $J_{kji}$ ,  $J_i^s$  и с использованием формул (9),  $\mathbf{q}_i = \mathbf{q}_k$  для  $k \in S_i$  получим  $J_{jii} = J_{jkk}$ . Следовательно,

$$\begin{aligned} J_i^s &= \sum_{j \in \bar{n}_i} J_{jii} = J_{iii} + \sum_{j \in n_i} J_{jii} = J_{iii} + \sum_{k \in S_i} \sum_{j \in \bar{n}_k} J_{jii} = J_{iii} + \sum_{k \in S_i} \sum_{j \in \bar{n}_k} J_{jkk} = \\ &= J_{iii} + \sum_{k \in S_i} J_k^s. \end{aligned}$$

Отсюда  $J_i^s - \sum_{k \in S_i} J_k^s = J_{iii}$ .

По формуле (3) имеем  $J_i^o - \sum_{k \in S_i} J_k^o = \sum_{k \in S_i} (m_k L_k^2 + 2L_k m_{kk}^e)$ .

Таким образом, последнее выражение  $H_{ii}$  принимает вид

$$\begin{aligned} H_{ii} &= \sum_{k \in S_i} H_{kk} + J_{iii} + \sum_{k \in S_i} (m_k L_k^2 + 2L_k m_{kk}^e) - \sum_{k \in S_i} e_{kk}^q (m_k L_k^2 e_{kk}^q + 2L_k m_{kk}^q) = \\ &= \sum_{j \in S_i} H_{jj} + J_{iii} + \sum_{j \in S_i} (m_j L_j^2 - m_j L_j^2 e_{jj}^{q2}) + \sum_{j \in S_i} (2L_j m_{jj}^e - 2L_j e_{jj}^q m_{jj}^q). \end{aligned}$$

Отсюда следует искомая формула (8). Утверждение доказано.

В плоских ДСТОВ (ПДСТОВ) все тела вращаются в параллельных друг другу плоскостях. Будем считать, что плоскость  $Oxy$  параллельна плоскостям движения тел и она образует с горизонтальной плоскостью угол  $q$ , где  $0 \leq q \leq 90^\circ$ . Нормаль к плоскостям движения обозначим через  $\mathbf{q}$ . Тогда  $\mathbf{q}_i = \mathbf{q}$  и  $\mathbf{q} \perp \mathbf{e}_i$  для всех  $i = 1, 2, \dots, N$ .

Для формального описания ПДСТОВ выберем исходное положение тел и для каждого тела мысленно представим СКТ( $i$ ) так, чтобы оси  $O_i x_i$ ,  $O_i y_i$  были параллельны осям  $Ox$ ,  $Oy$ . В качестве входных данных рассматриваемой ПДСТОВ будем приводить следующие постоянные параметры:  $L_i = O_{i-1} O_i$  –  $i$ -е межполюсное расстояние;  $\mathbf{e}_i = O_{i-1} O_i / L_i$  –  $i$ -й межполюсный орт, выраженный через орты СКТ( $i-1$ ); нулевые значения координат ЦМ( $i$ ), т. е. величин  $x_{ci}$ ,  $y_{ci}$ ;  $d_{xi}$ ,  $d_{yi}$  – координаты ЦМ ДТ( $i$ ) в СКТ( $i$ ), вычисляемые по формулам (1);  $x_{ij}^e$ ,  $y_{ij}^e$  – проекции орта  $\mathbf{e}_j$  на оси СКТ( $i$ ), где  $j \in S_i$ ;  $I_i^d = I_i^q + \sum_{j \in S_i} m_j L_j^2$  – момент инерции ДТ( $i$ ) относительно оси  $O_i \mathbf{q}$ ;  $I_i^q$  – момент инерции тела  $m_{oi}$  относительно оси  $O_i \mathbf{q}$ . В качестве относительного угла поворота тела  $m_{oi}$  примем  $q_i$  – угол, откладываемый от орта  $\mathbf{x}_{i-1}$  до орта  $\mathbf{x}_i$ . На кинематических схемах ДСТОВ ЦМ( $i$ ) будем изображать крестиком, а ЦМ ДТ( $i$ ) – звездочкой.

Для ПДСТОВ формулы выписывания ЭМИК значительно упрощаются. Поэтому для ПДСТОВ рекомендуем использовать

Утверждение 4. Для ПДСТОВ справедливы ОРФ:

$$H_{ii} = I_i^d + \sum_{j \in S_i} (H_{jj} + 2L_j m_{jj}^e), \quad (10)$$

$$H_{j,i-1} = H_{ji} + L_i m_{ji}^e, \quad (11)$$

$$m_{ji}^e = d_{xj} x_{ji}^e + d_{yj} y_{ji}^e + \sum_{k \in S_j} m_{ki}^e, \quad (12)$$

где  $x_{ji}^e = \mathbf{x}_j \cdot \mathbf{e}_i$ ,  $y_{ji}^e = \mathbf{y}_j \cdot \mathbf{e}_i$ .

Доказательство. Для ПДСТОВ  $e_{jj}^q = 0$ ,  $q_{ji}^e = 0$ ,  $z_{ji}^e = 0$ ,  $q_{ji}^q = 1$ . Следовательно, формулы (8), (7), (4) принимают искомые виды (10), (11), (12), где  $I_i^d = J_{iii} + \sum_{j \in S_i} m_j L_j^2$ ,  $J_{iii} = I_i^q$ . Утверждение доказано.

Для демонстрации эффективности использования утверждений 1–4 рассмотрим примеры.

### 3. Выписывание ЭМИК ангулярного МР в вертикальной плоскости на рис. 1

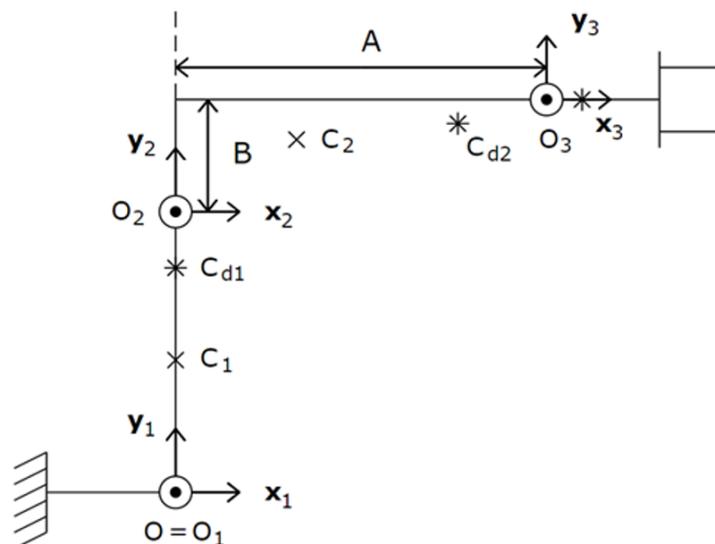


Рис.1. Ангулярный МР в вертикальной плоскости  
Fig. 1. Angular MR in vertical plane

Для рассматриваемого МР  $q = 90^\circ$ ,  $N = 3$ ,  $L_2 = O_1O_2$ ,  $L_3 = O_2O_3 = \sqrt{A^2 + B^2}$ ,  $I_3^d = I_3^q$ ,  $I_2^d = I_2^q + m_3L_3^2$ ,  $I_1^d = I_1^q + m_2L_2^2$ ,  $e_2 = y_1$ ,  $e_3 = \frac{O_2O_3}{L_3} = \frac{Ax_2 + By_2}{L_3} = ax_2 + by_2$ , где  $a = \frac{A}{L_3}$ ,  $b = \frac{B}{L_3}$ ,

$$x_{c1} = 0, \quad y_{c3} = 0, \quad x_{12}^e = 0, \quad y_{12}^e = 1, \quad x_{23}^e = a, \quad y_{23}^e = b. \quad (13)$$

По ОРФ (10) выпишем

$$H_{33} = I_3^d = I_3^q, \quad H_{22} = I_2^d + H_{33} + 2L_3m_{33}^e, \quad H_{11} = I_1^d + H_{22} + 2L_2m_{22}^e.$$

По ОРФ (11) выпишем

$$H_{32} = H_{33} + L_3m_{33}^e, \quad H_{31} = H_{32} + L_2m_{32}^e, \quad H_{21} = H_{22} + L_2m_{22}^e.$$

По формулам

$$d_{xi} = m_{oi}x_{ci} + \sum_{j \in S_i} m_j L_j x_{ij}^e, \quad d_{yi} = m_{oi}y_{ci} + \sum_{j \in S_i} m_j L_j y_{ij}^e, \quad (14)$$

с учетом равенств (13) выпишем

$$d_{x3} = m_{o3}x_{c3}, \quad d_{y3} = 0, \quad d_{x2} = m_{o2}x_{c2} + m_3L_3a, \quad d_{y2} = m_{o2}y_{c2} + m_3L_3b.$$

Отсюда по ОРФ (12) выпишем  $m_{33}^e = d_{x3}x_{33}^e$ ,  $m_{32}^e = d_{x3}x_{32}^e$ ,  $m_{22}^e = d_{x2}x_{22}^e + d_{y2}y_{22}^e + m_{32}^e$ , где с учетом обозначений

$$s_i = \sin(q_i), \quad c_i = \cos(q_i), \quad s_{ij} = \sin(q_i + q_j), \quad c_{ij} = \cos(q_i + q_j) \quad (15)$$

получим  $x_{32}^e = x_{31}^y = s_{23}$ ,  $x_{22}^e = x_{21}^y = s_2$ ,  $y_{22}^e = y_{21}^y = c_2$ ,

$$x_{33}^e = x_3 \cdot e_3 = x_3 \cdot (ax_2 + by_2) = ax_{32}^e + bx_{32}^y = ac_3 + bs_3.$$

Таким образом, искомые формулы выстраиваются в следующую последовательность:

$$\begin{aligned} H_{33} &= I_3^q, \quad m_{33}^e = d_{x3}(ac_3 + bs_3), \quad H_{22} = I_2^d + H_{33} + 2L_3m_{33}^e, \\ m_{32}^e &= d_{x3}s_{23}, \quad m_{22}^e = d_{x2}s_2 + d_{y2}c_2 + m_{32}^e, \quad H_{11} = I_1^d + H_{22} + 2L_2m_{22}^e, \\ H_{32} &= H_{33} + L_3m_{33}^e, \quad H_{31} = H_{32} + L_2m_{32}^e, \quad H_{21} = H_{22} + L_2m_{22}^e, \end{aligned}$$

в которой уменьшить количество операций сложения и умножения можно только за счет введения обозначений для произведений постоянных входных параметров МР. Например, если

$$\begin{aligned} I &= I_2^d + I_3^q, \quad L_2m_{32}^e = L_2d_{x3}s_{23} = L_s s_{23}, \quad I_{c3} = L_3m_{33}^e = L_3d_{x3}(ac_3 + bs_3) = L_a c_3 + L_b s_3, \\ I_{c2} &= L_2m_{22}^e = L_2(d_{x2}s_2 + d_{y2}c_2 + d_{x3}s_{32}) = L_d s_2 + L_c c_2 + L_s s_{32}, \end{aligned}$$

где  $L_a = L_3d_{x3}a$ ,  $L_b = L_3d_{x3}b$ ,  $L_c = L_2d_{y2}$ ,  $L_d = L_2d_{x2}$ ,  $L_s = L_2d_{x3}$  – константы, то вычисляемая ЭМИК оптимальная последовательность имеет вид

$$\begin{aligned} H_{33} &= I_3^q, \quad I_{c3} = L_a c_3 + L_b s_3, \quad H_{22} = I + 2I_{c3}, \quad I_s = L_s s_{23}, \quad I_{c2} = L_d s_2 + L_c c_2 + I_s, \\ H_{11} &= I_1^d + H_{22} + 2I_{c2}, \quad H_{32} = H_{33} + I_{c3}, \quad H_{31} = H_{32} + I_s, \quad H_{21} = H_{22} + I_{c2} \end{aligned}$$

и содержит 9 сложений и 7 умножений. Если использовать представления  $2I_{c2} = I_{c2} + I_{c2}$  и  $2I_{c3} = I_{c3} + I_{c3}$ , то вычисляемая последовательность будет содержать 11 сложений и 5 умножений.

#### 4. Выписывание ЭМИК двухрукого МР в горизонтальной плоскости

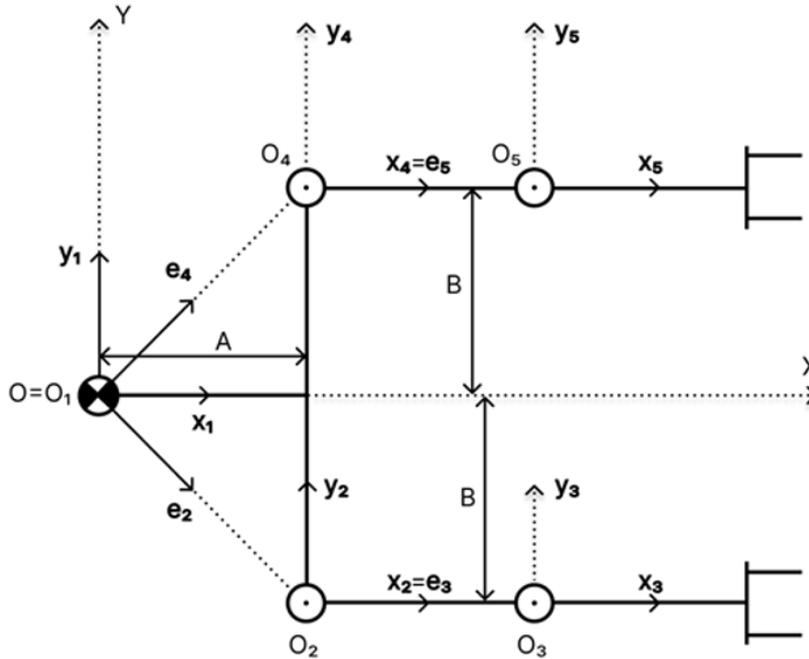


Рис. 2. Двухрукий ангулярный МР в горизонтальной плоскости  
Fig. 2. Two-hand angular MR in horizontal plane

На рис. 2 изображен двухрукий МР, для которого  $q = 0$ ,  $N = 5$ ,  $L_2 = O_1O_2 = \sqrt{A^2 + B^2}$ ,  $L_3 = O_2O_3$ ,  $L_4 = O_1O_4 = L_2$ ,  $L_5 = O_4O_5 = L_3$ ,  $I_3^d = I_3^q$ ,  $I_5^d = I_5^q$ ,  $I_2^d = I_2^q + m_3L_3^2$ ,  $I_4^d = I_4^q + m_5L_5^2$ ,  $I_1^d = I_1^q + m_2L_2^2 + m_4L_4^2$ ,  $e_5 = x_4$ ,  $e_3 = x_2$ ,  $e_4 = \frac{O_1O_4}{L_2} = ax_1 + by_1$ ,  $e_2 = \frac{O_1O_2}{L_2} = \frac{Ax_1 - By_1}{L_2} = ax_1 - by_1$ , где  $a = \frac{A}{L_2}$ ,  $b = \frac{B}{L_2}$ ,

$$y_{ci} = 0, (i = 1, 2, 3, 4, 5), \quad x_{45}^e = x_{44}^x = 1, \quad y_{45}^e = 0, \quad x_{23}^e = x_{22}^x = 1, \quad y_{23}^e = y_{22}^x = 0. \quad (16)$$

По ОРФ (10) выпишем

$$H_{33} = I_3^d = I_3^q, \quad H_{55} = I_5^d = I_5^q, \quad H_{22} = I_2^d + H_{33} + 2L_3m_{33}^e, \quad H_{44} = I_4^d + H_{55} + 2L_5m_{55}^e,$$

$$H_{11} = I_1^d + H_{22} + 2L_2m_{22}^e + H_{44} + 2L_4m_{44}^e = I_1^q + H_{22} + H_{44} + 2L_2(m_{22}^e + m_{44}^e).$$

По ОРФ (11) выпишем

$$H_{32} = H_{33} + L_3m_{33}^e, \quad H_{31} = H_{32} + L_2m_{32}^e, \quad H_{21} = H_{22} + L_2m_{22}^e,$$

$$H_{54} = H_{55} + L_5m_{55}^e, \quad H_{51} = H_{54} + L_4m_{54}^e, \quad H_{41} = H_{44} + L_4m_{44}^e.$$

Здесь учтено, что базой тела  $m_{04}$  является тело  $m_{01}$  и, следовательно, для  $i = 4$  имеет место равенство  $H_{j,i-1} = H_{j1}$ .

По формуле (14) с учетом (16) выпишем

$$d_{x3} = m_{03}x_{c3}, \quad d_{y3} = 0, \quad d_{x2} = m_{02}x_{c2} + m_3L_3, \quad d_{y2} = 0.$$

Отсюда по ОРФ (12) выпишем  $m_{33}^e = d_{x3}x_{33}^e$ ,  $m_{32}^e = d_{x3}x_{32}^e$ ,  $m_{22}^e = d_{x2}x_{22}^e + m_{32}^e$ . Отсюда с учетом выражений

$$x_{33}^e = x_{32}^x = c_3, \quad x_{32}^e = x_3 \cdot (ax_1 - by_1) = ax_{31}^x - bx_{31}^y = ac_{23} - bs_{23},$$

$$x_{22}^e = x_2 \cdot (ax_1 - by_1) = ax_{21}^x - bx_{21}^y = ac_2 - bs_2,$$

получим  $m_{33}^e = d_{x3}c_3$ ,  $m_{32}^e = d_{x3}(ac_{23} - bs_{23})$ ,  $m_{22}^e = d_{x2}(ac_2 - bs_2) + m_{32}^e$ .

Аналогично

$$m_{55}^e = d_{x5}c_5, \quad m_{54}^e = d_{x5}x_{54}^e, \quad x_{54}^e = x_5 \cdot (ax_1 + by_1) = ax_{51}^x + bx_{51}^y = ac_{45} + bs_{45},$$

$$m_{54}^e = d_{x5}(ac_2 - bs_2), \quad m_{44}^e = d_{x4}x_{44}^e + m_{54}^e, \quad x_{44}^e = x_4 \cdot (ax_1 + by_1) = ac_4 + bs_4.$$

Таким образом, искомые формулы выстраиваются в следующую последовательность:

$$\begin{aligned} H_{33} &= I_3^q, \quad m_{33}^e = d_{x3}c_3, \quad H_{22} = I_2^d + H_{33} + 2L_3m_{33}^e, \\ m_{32}^e &= d_{x3}s_{23}, \quad m_{22}^e = d_{x2}(ac_2 - bs_2) + m_{32}^e, \\ H_{32} &= H_{33} + L_3m_{33}^e, \quad H_{31} = H_{32} + L_2m_{32}^e, \quad H_{21} = H_{22} + L_2m_{22}^e, \\ H_{55} &= I_3^q, \quad m_{55}^e = d_{x5}c_5, \quad H_{44} = I_4^d + H_{55} + 2L_5m_{55}^e, \\ m_{54}^e &= d_{x5}s_{45}, \quad m_{44}^e = d_{x4}(ac_4 + bs_4) + m_{54}^e, \\ H_{54} &= H_{55} + L_5m_{55}^e, \quad H_{51} = H_{54} + L_4m_{54}^e, \quad H_{41} = H_{44} + L_4m_{44}^e, \\ H_{11} &= I_1^d + H_{22} + H_{44} + 2L_4(m_{22}^e + m_{44}^e). \end{aligned}$$

### 5. Синтез двурукого МР с линейными уравнениями динамики

Выпишем формулы вычисления ЭМИК ДСТОВ на рис. 3, из анализа которых найдем необходимые и достаточные условия, обеспечивающие этим ЭМИК постоянные значения.

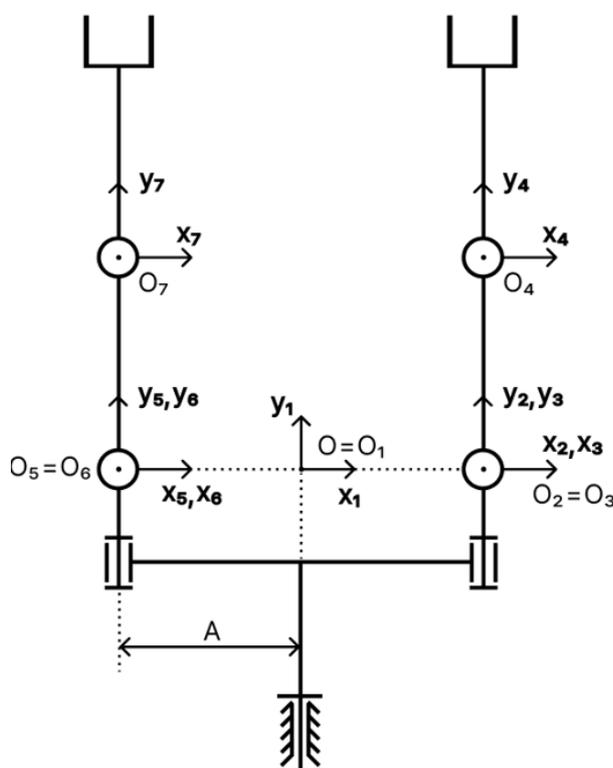


Рис. 3. Двурукий ангулярный МР  
Fig. 3. Two-hand angular MR

На кинематической схеме МР тела изображены в их исходных относительных положениях, т. е. когда углы  $q_i$  равны нулю.

Из формул (2), (3), (5) видно, что чем больше межполюсных расстояний равно нулю, тем проще формулы вычисления ЭМИК. Поэтому, вводя полюса тел, рекомендуется максимально их совмещать. Например, если оси вращения соседних тел пересекаются в одной точке, то эту точку следует принять за полюсы этих тел. В исходных положениях тел оси  $O_i x_i$ ,  $O_i y_i$ ,  $O_i z_i$  направлены параллельно соответствующим осям правой неподвижной системы координат, в которой ось  $Ox$  направлена горизонтально вправо, а ось  $Oy$  вертикально вверх. Поэтому оси СКТ на рисунках можно не изображать. В качестве формального описания ДСТОВ достаточно записать выражения орт  $q_i$  и  $e_i$  через орты СКТ.

Для МР на рис. 3 имеем  $N = 7$ ,  $L_1 = O_0 O_1 = 0$ ,  $L_2 = O_1 O_2 = O_1 O_5 = L_5$ ,  $L_3 = O_2 O_3 = O_5 O_6 = L_6 = 0$ ,  $L_4 = O_3 O_4 = O_6 O_7 = L_7$ ,  $e_2 = x_1$ ,  $e_4 = y_3$ ,  $e_5 = -x_1$ ,  $e_7 = y_6$ ,  $q_1 = y_1 = y$ ,  $q_2 = y_2 = y$ ,  $q_3 = z_3 = z_2$ ,  $q_4 = z_4 = z_3$ ,  $q_5 = y_5 = y$ ,  $q_6 = z_6 = z_5$ ,  $q_7 = z_7 = z_6$ .

По формулам (3), (5), учитывая, что  $S_4, n_4$  – пустые множества, выпишем  $J_4^o = 0, H_{44} = J_4^s + J_4^o = J_4^s$ . По формуле (6) выпишем

$$J_4^s = I_4^z + I_{z_4}^x x_{44}^{q2} + I_{z_4}^y y_{44}^{q2} - 2(I_4^{xy} x_{44}^q y_{44}^q + I_4^{xz} x_{44}^q z_{44}^q + I_4^{yz} y_{44}^q z_{44}^q).$$

Отсюда с учетом равенств  $x_{44}^q = x_{44}^z = 0, y_{44}^q = y_{44}^z = 0, z_{44}^q = z_{44}^z = 1$  получим  $J_4^s = I_4^z$ . Таким образом,  $H_{44} = I_4^z$ .

Учитывая, что  $\mathbf{q}_3 = \mathbf{q}_4$  по формуле (8), выпишем  $H_{33} = I_3^d + H_{44} + 2L_4(m_{44}^e - e_{44}^q m_{44}^q)$ , где  $e_{44}^q = y_{33}^z = 0$ , т. е.  $H_{33} = I_3^d + I_4^z + 2L_4 m_{44}^e$ . По формуле (4) выпишем  $m_{44}^e = m_{43}^y = d_{x_4} x_{43}^y + d_{y_4} y_{43}^y + d_{z_4} z_{43}^y$ . Отсюда, учитывая равенства  $x_{43}^y = \sin(q_4) = s_4, y_{43}^y = \cos(q_4) = c_4, z_{43}^y = 0$ , получим  $m_{44}^e = d_{x_4} s_4 + d_{y_4} c_4$ . Таким образом,  $H_{33} = I_3^d + I_4^z + 2L_4(d_{x_4} s_4 + d_{y_4} c_4)$ . Отсюда следует, что необходимыми и достаточными условиями независимости  $H_{33}$  от угла  $q_4$  являются следующие равенства:

$$d_{x_4} = d_{y_4} = 0, \quad (17)$$

т. е. ЦМ ДТ(4) должен лежать на оси  $O_4 \mathbf{z}_4$ . При этом  $H_{33} = I_3^d + I_4^z = \text{const}$ , где  $I_3^d = I_3^z + m_4 L_4^2$  – момент инерции ДТ(3) вокруг оси  $O_3 \mathbf{q}_3 = O_3 \mathbf{z}_3$ .

По формуле (5), с учетом равенств  $n_2 = \{3, 4\}, L_3 = 0$ , выпишем

$$H_{22} = J_2^s + J_2^o - L_4 e_{42}^q (m_4 L_4 e_{42}^q + 2m_{42}^q).$$

По ОРФ (3) с учетом (17), т. е. равенства  $m_{44}^e = 0$ , выпишем  $J_2^o = J_3^o = m_4 L_4^2 + 2L_4 m_{44}^e = m_4 L_4^2$ . По формуле (4) с учетом (17) выпишем  $m_{42}^q = m_{42}^y = d_{z_4} z_{42}^y = d_{z_4} z_{22}^y = 0$ . Таким образом, с учетом равенств  $J_2^o = m_4 L_4^2, e_{42}^q = y_{32}^y = c_3$  получим  $H_{22} = J_2^s + m_4 L_4^2 (1 - c_3^2)$ . Учитывая равенство  $\bar{n}_2 = \{2, 3, 4\}$ , формула (6) принимает вид

$$J_2^s = \sum_{j=2}^4 [I_j^z + I_{z_j}^x x_{j2}^{q2} + I_{z_j}^y y_{j2}^{q2} - 2(I_j^{xy} x_{j2}^q y_{j2}^q + I_j^{xz} x_{j2}^q z_{j2}^q + I_j^{yz} y_{j2}^q z_{j2}^q)].$$

Отсюда, учитывая обозначения (15) и равенства  $x_{22}^q = x_{22}^y = 0, y_{22}^q = y_{22}^y = 1, z_{22}^q = z_{22}^y = 0, x_{32}^q = x_{32}^y = s_3, y_{32}^q = c_3, z_{32}^q = 0, x_{42}^q = \sin(q_3 + q_4) = s_{34}, y_{42}^q = \cos(q_3 + q_4) = c_{34}, z_{42}^q = 0$ , получим

$$J_2^s = I_2^z + I_{z_2}^y + I_3^z + I_{z_3}^x s_3^2 + I_{z_3}^y c_3^2 - 2I_3^{xy} s_3 c_3 + I_4^z + I_{z_4}^x s_{34}^2 + I_{z_4}^y c_{34}^2 - 2I_4^{xy} s_{34} c_{34}.$$

Отсюда с учетом равенств  $s_3^2 = 1 - c_3^2, s_{34}^2 = 1 - c_{34}^2$  получим

$$H_{22} = I_2^z + I_{z_2}^y + I_3^z + I_{z_3}^x + m_4 L_4^2 + (I_{z_3}^y - I_{z_3}^x - m_4 L_4^2) c_3^2 - 2I_3^{xy} s_3 c_3 + I_4^z + I_{z_4}^x + (I_{z_4}^y - I_{z_4}^x) c_{34}^2 - 2I_4^{xy} s_{34} c_{34}.$$

Отсюда с учетом обозначений  $I_{zi}^x = I_i^x - I_i^z, I_{zi}^y = I_i^y - I_i^z$  получим

$$H_{22} = I_2^y + I_3^x + m_4 L_4^2 + (I_3^y - I_3^x - m_4 L_4^2) c_3^2 - 2I_3^{xy} s_3 c_3 + I_4^x + (I_4^y - I_4^x) c_{34}^2 - 2I_4^{xy} s_{34} c_{34}.$$

Отсюда видно, что необходимыми и достаточными условиями независимости  $H_{22}$  от углов  $q_3, q_4$  являются равенства (17) и следующие равенства:

$$I_3^y - I_3^x = m_4 L_4^2, \quad I_4^y = I_4^x, \quad I_3^{xy} = I_4^{xy} = 0, \quad (18)$$

при выполнении которых

$$H_{44} = I_4^z, \quad H_{33} = I_3^d + I_4^z, \quad H_{22} = I_2^y + I_3^x + I_4^x + m_4 L_4^2 = I_2^y + I_3^y + I_4^y$$

– постоянны, т. е. не зависят от углов  $q_3, q_4$ .

Подсистемы  $m_2$  и  $m_5$  совпадают. Поэтому необходимыми и достаточными условиями независимости  $H_{55}$  и  $H_{66}$  от углов  $q_6, q_7$  являются следующие равенства:

$$d_{x_7} = d_{y_7} = 0, \quad I_6^y - I_6^x = m_7 L_7^2, \quad I_7^y = I_7^x, \quad I_6^{xy} = I_7^{xy} = 0, \quad (19)$$

при выполнении которых  $H_{77} = I_7^z, H_{66} = I_6^d + I_7^z, H_{55} = I_5^y + I_6^x + m_7 L_7^2$  постоянны.

Учитывая равенства  $\mathbf{q}_1 = \mathbf{q}_2 = \mathbf{q}_5 = \mathbf{y}$ , по формуле (8) выпишем

$$H_{11} = I_1^d + H_{22} + H_{55} + 2L_2(m_{22}^e - e_{22}^q m_{22}^q) + 2L_5(m_{55}^e - e_{55}^q m_{55}^q),$$

где  $e_{22}^q = x_{12}^y = \mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{y} = 0, e_{55}^q = -\mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{y} = 0, m_{22}^e = m_{21}^x, m_{55}^e = \mathbf{m}_5 \cdot (-\mathbf{x}_1) = -m_{51}^x$ .

Для выписывания выражения  $m_{21}^x$ , т. е. проекции статического момента  $m_2$  на ось  $O_1x_1$ , используем ОРФ (4), в которой  $\xi = x$ ,  $i = 1$  и  $j$  изменяется от значения 4 до значения 2. Для  $j = 4$  с учетом (17) выпишем  $m_{41}^x = d_{z4}z_{41}^x = d_{z4}z_{21}^x = d_{z4}\sin(q_2) = d_{z4}s_2$ . Для  $j = 3$  выпишем  $m_{31}^x = d_{x3}x_{31}^x + d_{y3}y_{31}^x + d_{z3}z_{31}^x + m_{41}^x$ . По табл. 2 учебного пособия [5, с. 155] имеем  $x_{31}^x = c_2c_3$ ,  $y_{31}^x = -c_2s_3$ , т. е.  $m_{31}^x = d_{x3}c_2c_3 - d_{y3}c_2s_3 + d_{z3}s_2 + d_{z4}s_2$ . Для  $j = 2$  выпишем  $m_{21}^x = d_{x2}x_{21}^x + d_{y2}y_{21}^x + d_{z2}z_{21}^x + m_{31}^x$ , где  $x_{21}^x = c_2$ ,  $y_{21}^x = y_{11}^x = 0$ ;  $z_{21}^x = s_2$ , т. е.

$$m_{21}^x = d_{x2}c_2 + d_{z2}s_2 + d_{x3}c_2c_3 - d_{y3}c_2s_3 + d_{z3}s_2 + d_{z4}s_2 = [d_{x2} + (d_{x3}c_3 - d_{y3}s_3)]c_2 + (d_{z2} + d_{z3} + d_{z4})s_2.$$

Аналогично для  $m_{51}^x$  выпишем

$$m_{51}^x = d_{x5}c_5 + d_{z5}s_5 + d_{x6}c_5c_6 - d_{y6}c_5s_6 + d_{z6}s_5 + d_{z7}s_5 = [d_{x5} + (d_{x6}c_6 - d_{y6}s_6)]c_5 + (d_{z5} + d_{z6} + d_{z7})s_5.$$

Таким образом,  $H_{11} = I_1^d + H_{22} + H_{55} + 2L_2(m_{21}^x - m_{51}^x)$ , где по обозначению  $I_1^d = \text{const}$  – момент инерции ДТ(1) относительно оси  $O_1y$ . Отсюда следует, что необходимыми и достаточными условиями независимости  $H_{11}$  от углов  $q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7$  являются равенства (7)–(9), а также следующие равенства:

$$d_{z2} + d_{z3} + d_{z4} = 0, \quad d_{x3} = d_{y3} = d_{x2} = d_{x5} = d_{x6} = d_{y6} = 0, \quad d_{z5} + d_{z6} + d_{z7} = 0, \quad (20)$$

при выполнении которых  $H_{11} = I_1^d + H_{22} + H_{55} = \text{const}$ .

Выписывание поддиагональных ЭМИК ДСТОВ осуществляется по формуле (2), и если оси соседних шарниров параллельны, то по формуле (7).

Для  $j = 4$ ,  $i - 1 = 3$  по формуле (7) выпишем  $H_{43} = H_{44} + L_4(q_{44}^q m_{44}^e - q_{44}^e m_{44}^q)$ , где  $q_{44}^e = z_{43}^y = z_{33}^y = 0$ ,  $q_{44}^q = 1$  и с учетом условий (17)  $m_{44}^e = 0$ , т. е.  $H_{43} = H_{44}$ . Аналогично  $H_{76} = H_{77}$ .

Для  $j = 2$ ,  $i - 1 = 1$  по формуле (7) выпишем  $H_{21} = H_{22} + L_2(q_{22}^q m_{22}^e - q_{22}^e m_{22}^q)$ , где  $q_{22}^e = y_{11}^x = 0$ ,  $q_{22}^q = 1$ ,  $m_{22}^e = m_{21}^x$ , т. е.  $H_{21} = H_{22} + L_2 m_{21}^x$ . При выполнении условий (20)  $m_{21}^x = 0$ , т. е.  $H_{21} = H_{22} = \text{const}$ .

Для  $j = 5$ ,  $i - 1 = 1$  по формуле (7) выпишем  $H_{51} = H_{55} + L_5(q_{55}^q m_{55}^e - q_{55}^e m_{55}^q)$ , где  $q_{55}^e = -y_{11}^x = 0$ ,  $q_{55}^q = 1$ ,  $m_{55}^e = -m_{51}^x$ , т. е.  $H_{51} = H_{55} - L_5 m_{51}^x$ . При выполнении условий (20)  $m_{51}^x = 0$ , т. е.  $H_{51} = H_{55} = \text{const}$ .

Учитывая, что  $J_4^o = 0$ ,  $L_3 = 0$  и  $n_4$  – пустое множество, по формуле (2) выпишем

$$H_{42} = J_{42}^s + J_4^o q_{42}^q = J_{42}^s = J_{442} = I_4^x x_{44}^q x_{42}^q + I_4^y y_{44}^q y_{42}^q + I_4^z z_{44}^q z_{42}^q - I_4^{xy} (x_{44}^q y_{42}^q + y_{44}^q x_{42}^q) - I_4^{xz} (x_{44}^q z_{42}^q + z_{44}^q x_{42}^q) - I_4^{yz} (y_{44}^q z_{42}^q + z_{44}^q y_{42}^q).$$

Отсюда с учетом равенств  $x_{44}^q = x_{44}^z = 0$ ,  $y_{44}^q = y_{44}^z = 0$ ,  $z_{44}^q = 1$  получим

$$H_{42} = I_4^z z_{42}^q - I_4^{xz} x_{42}^q - I_4^{yz} y_{42}^q,$$

где  $z_{42}^q = z_{22}^y = 0$ ,  $x_{42}^q = x_{42}^y = s_{34}$ ,  $y_{42}^q = y_{42}^y = c_{34}$ , т. е.  $H_{42} = -I_4^{xz} s_{34} - I_4^{yz} c_{34}$ . Следовательно, необходимыми и достаточными условиями независимости  $H_{42}$  от углов  $q_3, q_4$  являются равенства  $I_4^{xz} = I_4^{yz} = 0$ .

Аналогично  $H_{75} = -I_7^{xz} s_{67} - I_7^{yz} c_{67}$ , т. е. необходимыми и достаточными условиями независимости  $H_{75}$  от углов  $q_6, q_7$  являются равенства  $I_7^{xz} = I_7^{yz} = 0$ .

Таким образом, необходимыми и достаточными условиями независимости  $H_{42}, H_{75}$  от углов  $q_3, q_4, q_6, q_7$  являются равенства

$$I_4^{xz} = I_4^{yz} = I_7^{xz} = I_7^{yz} = 0, \quad (21)$$

при выполнении которых  $H_{42} = H_{75} = 0$ .

Для  $j = 4$ ,  $i - 1 = 1$  по формуле (7) выпишем  $H_{41} = H_{42} + L_2(q_{42}^q m_{42}^e - q_{42}^e m_{42}^q)$ , где  $q_{42}^q = z_{22}^y = 0$ ,  $m_{42}^q = m_{42}^y = 0$ . Отсюда  $H_{41} = H_{42} = 0$ . Аналогично  $H_{61} = H_{72} = 0$ .

Учитывая, что  $L_3 = 0$  и  $n_3 = \{4\}$ , по формуле (2) выпишем

$$H_{32} = J_{32}^s + J_3^o q_{32}^q - L_4[e_{43}^q (m_4 L_4 e_{42}^q + m_{42}^q) + e_{42}^q m_{43}^q].$$

Отсюда с учетом равенств (17)  $q_{32}^q = z_{32}^y = z_{22}^y = 0$ ,  $e_{43}^q = y_{33}^z = 0$ ,  $e_{42}^q = y_{32}^y = c_3$ ,  $m_{43}^q = m_{44}^z = d_{z4}z_{44}^z = d_{z4}$  получим  $H_{32} = J_{32}^s - L_4 d_{z4} c_3$ , где по обозначению

$$J_{32}^s = J_{332} + J_{432} = I_3^x x_{33}^q x_{32}^q + I_3^y y_{33}^q y_{32}^q + I_3^z z_{33}^q z_{32}^q - I_3^{xy} (x_{33}^q y_{32}^q + y_{33}^q x_{32}^q) - I_3^{xz} (x_{33}^q z_{32}^q + z_{33}^q x_{32}^q) - I_3^{yz} (y_{33}^q z_{32}^q + z_{33}^q y_{32}^q) + I_4^x x_{43}^q x_{42}^q + I_4^y y_{43}^q y_{42}^q + I_4^z z_{43}^q z_{42}^q - I_4^{xy} (x_{43}^q y_{42}^q + y_{43}^q x_{42}^q) - I_4^{xz} (x_{43}^q z_{42}^q + z_{43}^q x_{42}^q) - I_4^{yz} (y_{43}^q z_{42}^q + z_{43}^q y_{42}^q).$$

Отсюда с учетом равенств  $x_{33}^q = x_{33}^z = 0$ ,  $y_{33}^q = y_{33}^z = 0$ ,  $z_{33}^q = z_{33}^z = 1$ ,  $x_{32}^q = x_{32}^y = s_3$ ,  $y_{32}^q = y_{32}^y = c_3$ ,  $z_{32}^q = z_{32}^y = z_{22}^y = 0$ ,  $x_{43}^q = x_{44}^z = 0$ ,  $y_{43}^q = y_{44}^z = 0$ ,  $z_{43}^q = z_{44}^z = 1$ ,  $z_{42}^q = z_{32}^q = 0$ ,  $x_{42}^q = x_{42}^y = s_{34}$ ,  $y_{42}^q = y_{42}^y = c_{34}$ , получим  $J_{32}^s = -I_3^{xz} s_3 - I_3^{yz} c_3 - I_4^{xz} s_{34} - I_4^{yz} c_{34}$ , т. е.

$$H_{32} = -I_3^{xz} s_3 - (I_3^{yz} + L_4 d_{z4}) c_3 - I_4^{xz} s_{34} - I_4^{yz} c_{34}.$$

Следовательно, необходимыми и достаточными условиями независимости  $H_{32}$  от углов  $q_3$ ,  $q_4$  являются равенства

$$I_3^{yz} + L_4 d_{z4} = 0, \quad I_3^{xz} = I_4^{xz} = I_4^{yz} = 0, \quad (22)$$

при выполнении которых  $H_{32} = 0$ .

Для  $j = 3$ ,  $i - 1 = 1$  по формуле (7) выпишем  $H_{31} = H_{32} + L_2 (q_{32}^q m_{32}^e - q_{32}^e m_{32}^q)$ , где  $q_{32}^q = z_{22}^y = 0$ ,  $q_{32}^e = z_{21}^x = s_2$ ,  $m_{32}^q = m_{32}^y$ , т. е.  $H_{31} = H_{32} - L_2 m_{32}^y s_2$ . Учитывая равенство  $z_{42}^y = z_{22}^y = 0$ , по формуле (4) имеем  $m_{42}^y = 0$ . Следовательно,  $m_{32}^y = d_{x3} x_{32}^y + d_{y3} y_{32}^y + d_{z3} z_{32}^y$ . Отсюда с учетом равенств  $x_{32}^y = x_{32}^z = s_3$ ,  $y_{32}^y = c_3$ ,  $z_{32}^y = z_{22}^y = 0$  получим  $m_{32}^y = d_{x3} s_3 + d_{y3} c_3$ . Следовательно,  $H_{31} = H_{32} - L_2 (d_{x3} s_3 + d_{y3} c_3) s_2$  и с учетом условий (20), (22) получим  $H_{31} = H_{32} = 0$ . Аналогично  $H_{61} = H_{65} = 0$ .

Таким образом, для независимости от углов поворота тел ЭМИК МР на рис. 3 необходимо и достаточно массы тел распределить так, чтобы выполнялись условия (17)–(22). Практическая реализация условий независимости подсистем  $m_2$  ( $m_5$ ) от углов  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $q_4$  ( $q_5$ ,  $q_6$ ,  $q_7$ ) описана, например, в учебных пособиях [16, 17] и статье [4], где указано, что в первую очередь необходимо статически уравновесить ДТ(4) и ДТ(3) (аналогично ДТ(7) и ДТ(6)). Тогда силы тяжести, приведенные к осям вращения всех тел МР на рис. 3, обнуляются. Следовательно, уравнения динамики МР на рис. 3 примут вид системы семи линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами, которые интегрируются элементарно.

Описание возможных вариантов практической реализации остальных условий выходит за пределы заявленной темы статьи.

### Заключение

Предложенный формализм выписывания ЭМИК рассмотренных ДСТОВ позволяет легко и быстро получить выражения их кинетической энергии. Совместно с формализмом выписывания уравнений динамики в форме уравнения Лагранжа второго рода, изложенным в статье [15], удастся существенно упростить вывод уравнений динамики ДСТОВ в символьном виде с явной записью центробежных и кориолисовых инерционных моментов сил, а также с выделением из них гироскопических составляющих. Применение известных методов учета связей в уравнениях динамики расширяет область использования предлагаемых формализмов на ДСТОВ со связями концевых тел и систем тел с переменной структурой.

### Список литературы

1. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматиз, 1961. 824 с.
2. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л. Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. 216 с.
3. Тимофеев А.В. Управление роботами: учеб. пособие. Л.: Изд-во Изд-во ЛГУ, 1986. 240 с.
4. Телегин А.И. Синтез систем твердых тел с заданными свойствами. Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1996. 174 с.
5. Телегин А.И. Основы теоретической механики систем тел. С приложениями в робототехнике: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2023. 252 с. ISBN 978-5-507-45089-3.
6. Tourassis V.D., Neuman C.P. The inertial characteristics of dynamic robot models // Mech. and Mach. Theory. 1985. Vol. 20, no. 1. P. 41–52.
7. Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел: пер. с англ. М.: Мир, 1980. 292 с.
8. Лилов Л.К. Моделирование систем связанных тел. М.: Наука, 1993. 272 с.

9. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы: пер. с англ. М.: Мир, 1976. 541 с.
10. Белецкий В.В. Двуногая ходьба: модельные задачи динамики и управления. М.: Наука, 1984. 288 с.
11. Шагающие машины / Д.Е. Охочимский, А.К. Платонов, А.А. Кирильченко, В.В. Лапшин. М.: Ин-т прикл. математики им. М.В. Келдыша АН СССР, 1989. 36 с. (Препринт № 87)
12. Охочимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. 312 с.
13. Sadati S.M.H., Naghibi S.E., Naraghi M. An Automatic Algorithm to Derive Linear Vector Form of Lagrangian Equation of Motion with Collision and Constraint // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 76. P. 217–222. DOI: 10.1016/j.procs.2015.12.345
14. Бутырин С.А. Разработка алгоритмов управления манипулятором с компенсацией взаимовлияния движений и программного обеспечения численных экспериментов с моделями роботов на ЭВМ: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1982. 144 с.
15. Телегин А.И. Выделение гироскопических инерционных сил из центробежных и кориолисовых инерционных сил // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2024. Т. 24, № 1. С. 63–74. DOI: 10.14529/ctcr240106
16. Мелентьев Ю.И., Телегин А.И. Расчет уравновешенных манипуляторов. Магнитогорск: МГМИ, 1984. 39 с.
17. Мелентьев Ю.И., Телегин А.И. Динамика манипуляционных систем роботов. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1984. 360 с.

#### References

1. Lurie A.I. *Analiticheskaya mekhanika* [Analytical Mechanics]. Moscow: Fizmatiz; 1961. 824 p. (In Russ.)
2. Bortsov Yu.A., Polyakhov N.D., Putov V.V. *Elektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i modal'nyim upravleniem* [Electromechanical systems with adaptive and modal control]. Energoatomizdat. Leningrad branch; 1984. 216 p. (In Russ.)
3. Timofeev A.V. *Upravlenie robotami: ucheb. posobie* [Robot control: A textbook]. Leningrad: Leningrad State University Publ.; 1986. 240 p. (In Russ.)
4. Telegin A.I. *Sintez sistem tverdykh tel s zadannymi svoystvami* [Synthesis of systems of solids with specified properties]. Chelyabinsk: Chelyabinsk State Technical University Publ.; 1996. 174 p. (In Russ.)
5. Telegin A.I. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki sistem tel. S prilozheniyami v robototekhnike: ucheb. posobie dlya vuzov* [Fundamentals of theoretical mechanics of body systems. With applications in robotics: textbook for universities]. St. Petersburg: Lan; 2023. 252 p. (In Russ.) ISBN 978-5-507-45089-3.
6. Tourassis V.D., Neuman C.P. The inertial characteristics of dynamic robot models. *Mech. and Mach. Theory*. 1985;20(1):41–52.
7. Wittenburg J. *Dynamics of systems of rigid bodies*. Transl. from Engl. Moscow: Mir; 1980. 292 p. (In Russ.)
8. Lilov L.K. *Modelirovanie sistem svyazannykh tel* [Modeling of systems of connected bodies]. Moscow: Nauka; 1993. 272 p. (In Russ.)
9. Vukobratovic M. *Shagayushchie roboty i antropomorfnye mekhanizmy* [Walking robots and anthropomorphic mechanisms]. Transl. from Engl. Moscow: Mir; 1976. 541 p. (In Russ.)
10. Beletskiy V.V. *Dvunogaya khod'ba: model'nye zadachi dinamiki i upravleniya* [Bipedal walking: model problems of dynamics and control]. Moscow: Nauka; 1984. 288 p. (In Russ.)
11. Okhotsimskiy D.E., Platonov A.K., Kirilchenko A.A., Lapshin V.V. *Shagayushchie mashiny* [Walking machines]. Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics of the USSR Academy of Sciences; 1989. 36 p. (Preprint No. 87) (In Russ.)
12. Okhotsimskiy D.E., Golubev Yu.F. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem avtomaticheskogo shagayushchego apparata* [Mechanics and motion control of automatic walking apparatus]. Moscow: Nauka. Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature; 1984. 312 p. (In Russ.)
13. Sadati S.M.H., Naghibi S.E., Naraghi M. An Automatic Algorithm to Derive Linear Vector Form of Lagrangian Equation of Motion with Collision and Constraint. *Procedia Computer Science*. 2015;76:217–222. DOI: 10.1016/j.procs.2015.12.345

14. Butyrin S.A. *Razrabotka algoritmov upravleniya manipulyatorom s kompensatsiey vzaimovliyaniya dvizheniy i programmnogo obespecheniya chislennykh eksperimentov s modelyami robotov na EVM: dis. kand. tekhn. nauk* [Development of the manipulator control algorithms with the motion mutual influence compensation and the software for the numerical experiments with the robot models on the computer. Cand. sci. diss.]. Tomsk; 1982. 144 p. (In Russ.)

15. Telegin A.I. Separation of gyroscopic inertial forces from centrifugal and Coriolis inertial forces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1): 63–74. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240106

16. Melent'ev Yu.I., Telegin A.I. *Raschet uravnoveshennykh manipulyatorov* [Calculation of balanced manipulators]. Magnitogorsk: Magnitogorsk Mining and Metallurgical Institute Publ.; 1984. 39 p.

17. Melent'ev Yu.I., Telegin A.I. *Dinamika manipulyatsionnykh sistem robotov* [Dynamics of manipulation systems of robots]. Irkutsk: Irkutsk University Publ.; 1984. 360 p. (In Russ.)

#### ***Информация об авторе***

**Телегин Александр Иванович**, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры автоматике, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия; teleginai@susu.ru.

#### ***Information about the author***

**Aleksandr I. Telegin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Prof. of the Department of Automation, South Ural State University, Miass, Russia; teleginai@susu.ru.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

***Статья поступила в редакцию 06.02.2025***

***The article was submitted 06.02.2025***

# Инфокоммуникационные технологии и системы Infocommunication technologies and systems

Научная статья

УДК 681.5.01

DOI: 10.14529/ctcr250204

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЛАСТЕЙ СУЩЕСТВОВАНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА НА ОСНОВЕ КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ПРОЕКЦИЙ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА

**М.А. Девятков**, [deviatovma@susu.ru](mailto:deviatovma@susu.ru)

**П.А. Угаров**, [ugarovpa@susu.ru](mailto:ugarovpa@susu.ru)

**В.Ф. Тележкин**, [telezhkinvf@susu.ru](mailto:telezhkinvf@susu.ru)

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** В работе предложен метод нейросетевой оптимизации областей существования скользящего режима в проекциях фазового пространства объекта управления с целью последующего синтеза систем управления со скользящими режимами. Расширение областей существования скользящего режима предоставляет большую свободу в выборе поверхностей скольжения, в том числе нелинейных, и позволяет рассчитывать на повышение качества управления. **Цель исследования** заключается в определении применимости современных методов машинного обучения, в частности нейронных сетей и генетических алгоритмов, в задачах оптимизации областей существования скользящего режима на примере нелинейной системы 4-го порядка. **Материалы и методы.** Для решения задачи применяются численные методы машинного обучения нейронных сетей и стохастического направленного поиска, в частности генетические алгоритмы. Также применяется метод анализа двумерных проекций фазового пространства многомерной системы. **Результаты.** Предложена структурная классификация проекций фазового пространства с нейросетевой оптимизацией областей существования скользящего режима для обеспечения автоматизированного синтеза алгоритмов управления. На примере импульсного преобразователя 4-го порядка рассмотрены особенности проекций фазовых пространств многомерных систем. Предложен способ формирования линий переключения для скользящего режима на основе проекций фазового пространства, позволяющий классифицировать проекции с точки зрения их пригодности к организации управления в скользящем режиме. Произведена максимизация областей существования скользящего режима с помощью стохастического генетического алгоритма и с использованием нейронной сети в виде многослойного перцептрона. Сеть реализована на базе библиотеки для построения и обучения нейронных сетей TensorFlow. Для обновления модели применен оптимизатор Adam. Показано, что оптимизация с помощью генетического алгоритма и нейронной сети позволяет значительно увеличить потенциал выбора алгоритмов управления за счет расширения областей существования скользящего режима в проекциях фазового пространства. **Заключение.** Результаты применения генетического алгоритма и многослойной нейронной сети демонстрируют, что предложенный метод расширяет область применения проекций фазового пространства в задачах синтеза управления многомерными нелинейными системами и открывает новые возможности для повышения эффективности управления в скользящих режимах.

**Ключевые слова:** проекции фазового пространства, качественный анализ фазового пространства, скользящий режим, нейронные сети, многослойный перцептрон, генетический алгоритм

**Для цитирования:** Девятков М.А., Угаров П.А., Тележкин В.Ф. Нейросетевая оптимизация областей существования скользящего режима на основе качественного анализа проекций фазового пространства // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 46–54. DOI: 10.14529/ctcr250204

## NEURAL NETWORK OPTIMIZATION OF AREAS OF EXISTENCE OF THE SLIDING MODE ON THE BASIS OF QUALITATIVE ANALYSIS OF PHASE SPACE PROJECTIONS

M.A. Devyatov, deviatovma@susu.ru

P.A. Ugarov, ugarovpa@susu.ru

V.F. Telezhkin, telezhkinvf@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The paper proposes a method for neural network optimization of the regions of existence of a sliding mode in the projections of the phase space of a control object for the purpose of subsequent synthesis of control systems with sliding modes. Expanding the regions of existence of a sliding mode provides greater freedom in choosing sliding surfaces, including nonlinear ones, and allows us to expect an improvement in the quality of control. **The purpose of the study** is to determine the applicability of modern machine learning methods, in particular neural networks and genetic algorithms, in problems of optimizing the regions of existence of a sliding mode using the example of a 4th order nonlinear system. **Materials and Methods.** To solve the problem, numerical methods of machine learning of neural networks and stochastic directed search, in particular, genetic algorithms, are used. A method for analyzing particular two-dimensional projections of the phase space of a multidimensional system is also used. **Results.** A structural classification of phase space projections with neural network optimization of the regions of existence of a sliding mode is proposed to ensure automated synthesis of control algorithms. The paper considers the features of phase space projections of multidimensional systems using a fourth-order pulse converter as an example. It proposes a method for constructing switching lines for a sliding mode based on phase space projections, which allows classifying projections in terms of their suitability for organizing control in a sliding mode. The sliding mode existence regions are maximized using a stochastic genetic algorithm and a neural network in the form of a multilayer perceptron. The network is implemented using the TensorFlow library for constructing and training neural networks. The Adam optimizer is used to update the model. It is shown that optimization using a genetic algorithm and a neural network allows for a significant increase in the potential for selecting control algorithms by expanding the sliding mode existence regions in phase space projections. **Conclusion.** The results of the application of the genetic algorithm and training of a multilayer neural network demonstrate that the proposed method expands the scope of application of phase space projections in problems of synthesis of control of multidimensional nonlinear systems and opens up new possibilities for increasing the efficiency of control in sliding modes.

**Keywords:** phase space projections, qualitative phase space analysis, sliding mode, neural networks, multilayer perceptron, genetic algorithm

**For citation:** Devyatov M.A., Ugarov P.A., Telezhkin V.F. Neural network optimization of areas of existence of the sliding mode on the basis of qualitative analysis of phase space projections. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2025;25(2):46–54. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250204

### Введение

Системы, работающие в существенно нелинейных режимах, обладают большим потенциалом для разработки эффективных алгоритмов управления. Например, в работах [1, 2] предложен метод автоматизированного синтеза управления, основанный на качественном анализе графических представлений фазовых пространств. Такой подход является универсальным и позволяет существенно упростить синтез управления. По структуре фазового пространства можно определять многие значимые характеристики, такие как устойчивость, быстродействие, ошибки и т. д. Однако метод [1] имеет и ряд недостатков. Хотя он применим к системам любой размерности, анализ фазовых пространств при увеличении порядка модели требует все больше вычислительных затрат. Кроме того, для систем порядка выше 3-го затруднена визуализация результатов.

Авторы [3] продемонстрировали, что для синтеза управления нет нужды использовать фазовые пространства полной размерности. Можно анализировать не все фазовое пространство сис-

темы, а лишь его часть, то есть некоторое фазовое подпространство. При этом наиболее просто описываются и хорошо визуализируются подпространства в виде двумерных проекций.

Однако переход от многомерного фазового пространства к двумерной проекции приводит к потере значимых данных. Фазовое пространство любой системы представляет собой семейство непересекающихся друг с другом фазовых траекторий (за исключением состояний равновесия и циклов). Эти траектории содержат полную информацию о системе, что позволяет использовать их для синтеза управления. При этом особое место занимают скользящие режимы, которые не слишком требовательны к форме фазовых траекторий. Для поддержания скользящего режима достаточно, чтобы фазовые траектории в окрестности линии переключения (скольжения) были направлены к ней. Это позволяет синтезировать алгоритмы управления на основе анализа проекций пространства [2]. Использование нескольких проекций открывает возможность компенсировать недостаток данных для организации управления в одной проекции за счет учета особенностей траекторий в других проекциях. Тем не менее выбор оптимальной линии скольжения представляет собой сложную задачу, и для расширения областей существования скользящего режима в проекциях фазового пространства представляется перспективным использовать современные методы машинного обучения, в частности нейронные сети и генетические алгоритмы.

### 1. Общая схема синтеза управления на основе анализа структуры фазового пространства

Синтез управления на основе качественного анализа фазового пространства, в том числе в скользящем режиме, включает следующие основные шаги [4].

**Шаг 1.** С помощью численных методов строятся траектории дискретизированного фазового пространства системы в заданной области, после чего найденные траектории заменяются направленными графами, отражающими векторы фазовой скорости.

**Шаг 2.** Проводится анализ полученной численной модели фазового пространства методами численной геометрии с целью его разделения на области существования скользящего режима, зоны управляемости, участки однообразного движения и т. д.

**Шаг 3.** Вся собранная информация применяется для синтеза алгоритма управления согласно установленным критериям качества.

Такой подход позволяет работать не с траекториями в полном фазовом пространстве, а с их проекциями на набор фазовых плоскостей или подпространств более высокой размерности. При этом вместо массива векторов фазовых траекторий полной размерности создается несколько массивов для подпространств, а задача сводится к согласованию движения по проекциям.

### 2. Фазовые пространства импульсного преобразователя напряжения 4-го порядка

В качестве примера рассмотрим импульсный преобразователь 4-го порядка, схема которого представлена на рис. 1.

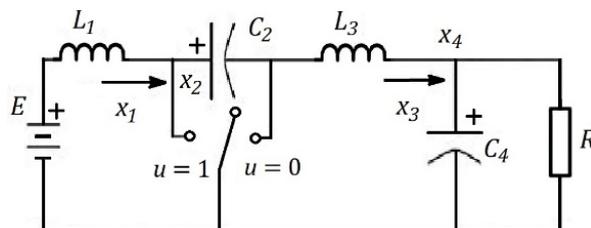


Рис. 1. Схема импульсного преобразователя для моделирования  
Fig. 1. Schematic diagram of a pulse converter for simulation

Математическая модель этого преобразователя [5] с учетом паразитных активных сопротивлений индуктивностей:

$$L_1 \dot{x}_1 = -r_1 x_1 - (1 - u)x_2 + E;$$

$$C_2 \dot{x}_2 = (1 - u)x_1 + ux_3;$$

$$L_3 \dot{x}_3 = -ux_2 - r_2 x_3 - x_4;$$

$$C_4 \dot{x}_4 = x_3 - \frac{1}{r_L} x_4;$$

$$y = x_4,$$

где  $x \in R^4$  – вектор состояния;  $x_1$  – ток через катушку индуктивности  $L_1$ ;  $x_2$  – напряжение на конденсаторе  $C_2$ ;  $x_3$  – ток через катушку индуктивности  $L_4$ ;  $x_4$  – напряжение на конденсаторе  $C_4$ ;  $E$  – напряжение питания;  $r_1$  – активное сопротивление катушки индуктивности  $L_1$ ;  $r_2$  – активное сопротивление катушки индуктивности  $L_4$ ;  $r_L$  – сопротивление нагрузки;  $u \in (0, 1)$  – управляющее воздействие;  $y$  – выходная переменная, доступная измерению.

На рис. 2 представлены двумерные фазовые портреты в зависимости от положения ключа ( $u = 0$  и  $u = 1$ ) для пяти начальных условий, полученные методами численного моделирования. Программное обеспечение реализовано на языке Python с привлечением библиотек Matplotlib и NumPy. Пересечения на рис. 2 обусловлены наложением кривых, относящихся к разным значениям управляющего воздействия. Эти значения формируют две структуры, зависящие от положения ключа  $S$ .

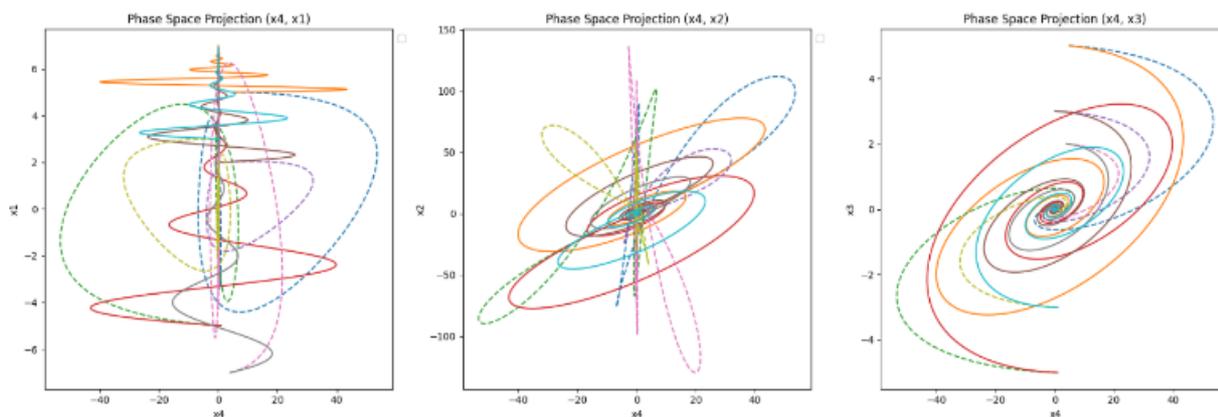


Рис. 2. Вид проекций  $(x_4, x_1)$ ,  $(x_4, x_2)$  и  $(x_4, x_3)$  фазового пространства для разных начальных условий  
Fig. 2. View of the projections  $(x_4, x_1)$ ,  $(x_4, x_2)$  and  $(x_4, x_3)$  of the phase space for different initial conditions

Предварительный анализ показывает, что углы векторов фазовых скоростей изменяются в широких диапазонах, что указывает на возможность реализации скользящего режима.

### 3. Синтез поверхностей для организации скользящего режима

В теории систем управления со скользящими режимами [6–8] традиционно рассматриваются в основном задачи синтеза управления по заранее заданной поверхности скольжения. Однако численный анализ фазового пространства открывает возможности автоматического синтеза таких поверхностей, в том числе с оптимизацией современными методами машинного обучения.

Рассмотрим построение линии переключения для двумерной системы или в двумерной проекции фазового пространства. Будем считать, что все пространство дискретизировано на ячейки. На рис. 3 проведены линии через вершины одной из таких ячеек. Это прямые, проходящие через отрезки, соединяющие правую верхнюю и левую верхнюю вершины с левой нижней и правой нижней вершинами ячейки соответственно. Например, уравнение линии между левой верхней и правой нижней вершинами:

$$y = kx + b,$$

$$k = \frac{y_{Top\_Left} - y_{Bottom\_Right}}{x_{Bottom\_Left} - x_{Top\_Right}}, \quad b = y_{Top\_Left} - kx_{Bottom\_Left}.$$

Если попробовать синтезировать скользящий режим непосредственно по данной линии, скорее всего, скольжение будет невозможно, поскольку линия полностью принадлежит плоскости фазовой проекции и не зависит от переменных состояния вне этой плоскости, а, как показывают векторные поля для таких вырожденных случаев, векторы фазовой скорости обычно практически сонаправлены.

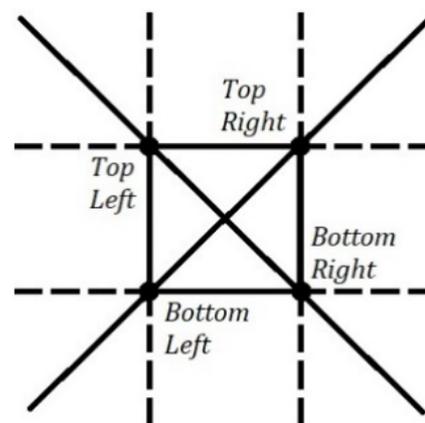


Рис. 3. Ячейка с линиями скольжения  
Fig. 3. Cell with the sliding lines

Это утверждение можно верифицировать, рассмотрев линию переключения в виде  $S = y - kx - b$ . Условие существования скользящего режима, как известно [9], имеет вид  $S \frac{dS}{dt} < 0$ .

На рис. 4 представлены три проекции фазового пространства импульсного преобразователя 4-го порядка, классифицированные на области, в которых скользящий режим на линии возможен, и области, в которых скользящий режим отсутствует. Классификация производилась с использованием меток выполнения условия существования скользящего режима (зеленые кружки указывают на возможность организации скользящего режима, а красные крестики – на отсутствие возможности). Как и предполагалось, синтезировать управление в скользящем режиме в таких условиях практически невозможно.

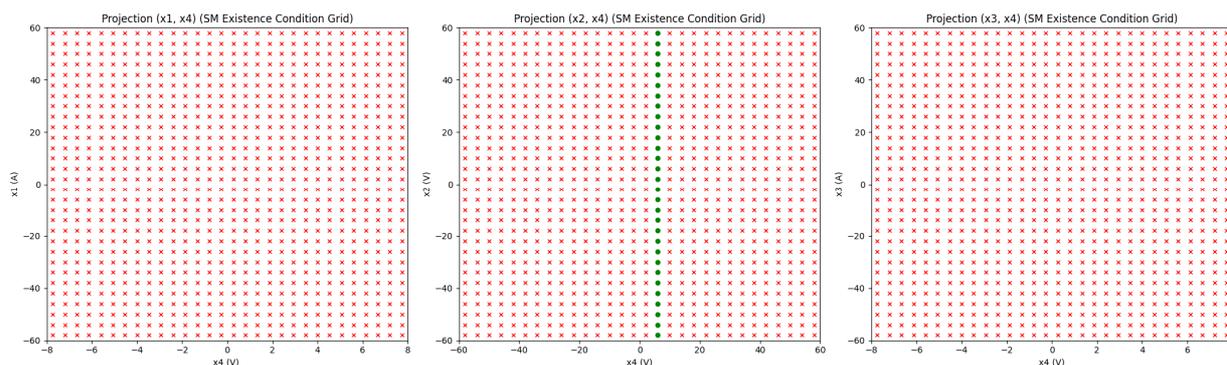


Рис. 4. Проекция фазового пространства  $(x_4, x_1)$ ,  $(x_4, x_2)$  и  $(x_4, x_3)$  с метками существования скользящего режима  
Fig. 4. Projections of the phase space  $(x_4, x_1)$ ,  $(x_4, x_2)$  and  $(x_4, x_3)$  with labels of the existence of a sliding mode

Для решения этой проблемы можно модифицировать линию скольжения таким образом, чтобы учитывались все переменные состояния. Для этого добавим в формулу линии скольжения линейную комбинацию отсутствующих координат. Тогда линия скольжения будет описываться выражением  $S = y - kx - b - \alpha_1 v - \alpha_2 z$ , где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты переменных состояния вне исходной проекции.

Выбор коэффициентов для координат, не принадлежащих рассматриваемой проекции фазового пространства, представляет собой отдельную сложную задачу. Чтобы максимизировать области существования скользящего режима в проекциях и тем самым расширить возможности синтеза управления в скользящем режиме, выполним оптимизацию коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  методами машинного обучения.

#### 4. Оптимизация областей существования скользящего режима

Для решения поставленной задачи можно использовать различные методы численной оптимизации – нейронные сети, генетические алгоритмы и т. д. При этом с точки зрения последующего синтеза управления имеет значение как общий размер областей существования скользящих режимов во всех проекциях, так и площадь этих областей в приоритетных двумерных проекциях.

Для начала попробуем оптимизировать области существования скользящего режима с помощью генетических алгоритмов [10]. Используем метод дифференциальной эволюции (DE) – стохастический метод глобальной оптимизации, эффективный для задач с непрерывными параметрами. Он отличается гибкостью, устойчивостью к локальным оптимумам, так как механизмы мутации и рекомбинации обеспечивают глобальный поиск, и хорошей скоростью сходимости. Генетический алгоритм реализуем на базе библиотеки SciPy. Основные параметры конфигурации DE (подобраны эмпирически).

- **Стратегия best1bin:** комбинация best (лучшая особь) и bin (биномиальное скрещивание) обеспечивает устойчивый поиск без преждевременной сходимости.
- **Популяция (popsize = 15):** оптимальна для 2D-пространства поиска (2 коэффициента).
- **Мутация (mutation = (0.5, 1)):** динамический диапазон для адаптации скорости поиска.
- **Рекомбинация (recombination = 0.8):** высокая вероятность сохраняет полезные признаки.

Результаты работы генетического алгоритма для проекции  $(x_2, x_4)$  представлены на рис. 5. Очевидно, что благодаря оптимизации доступная область организации движения в скользящем режиме значительно расширилась – достаточно сравнить количество зеленых точек на рис. 5 и на среднем изображении на рис. 4.

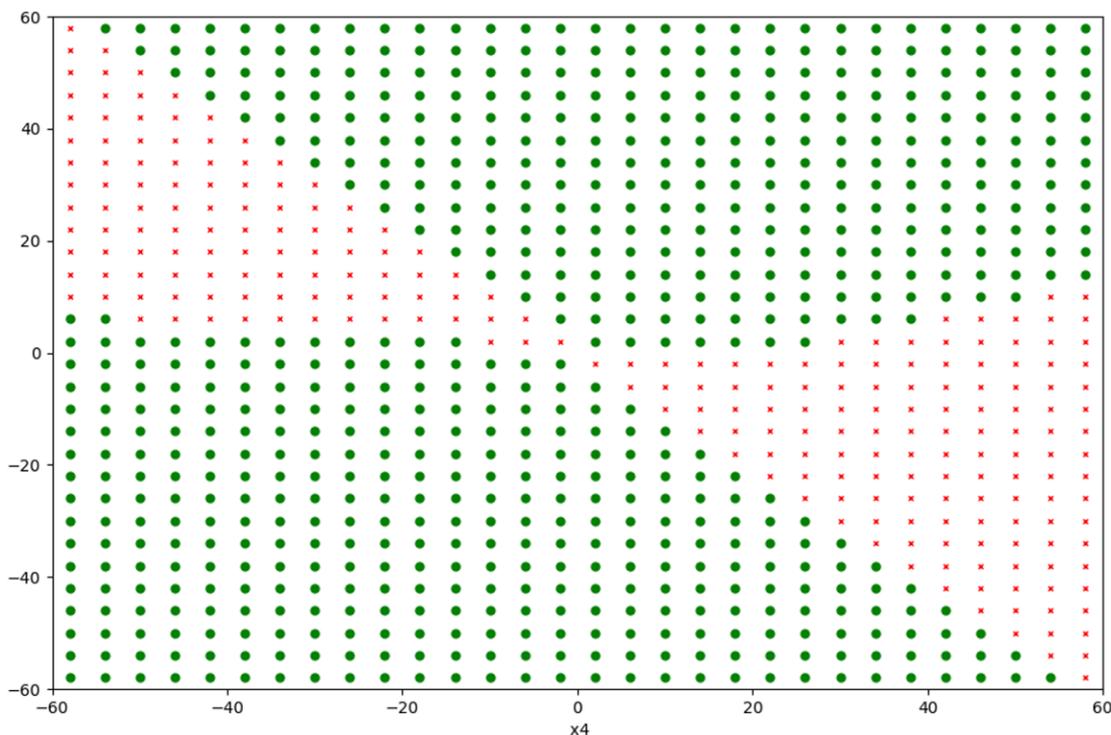


Рис. 5. Результаты оптимизации области существования скользящего режима в проекции  $(x_2, x_4)$  с помощью генетического алгоритма (зеленые точки – скользящий режим существует)  
Fig. 5. Results of optimization of the region of existence of the sliding mode in the projection  $(x_2, x_4)$  using a genetic algorithm (green dots – the sliding mode exists)

Теперь решим эту же задачу с помощью нейронной сети. Используем многослойный перцептрон [11–13]. Это наиболее подходящий вид нейронной сети, так как рассматриваемая задача сводится к регрессии, входные данные обладают малой размерностью, а многослойный перцептрон позволяет гибко настраивать архитектуру и добавлять регуляризацию для предотвращения переобучения, что важно в задачах с малым массивом данных. Кроме того, веса перцептрона эффективно оптимизируются с использованием стохастического градиентного спуска, что легко реализуется с использованием современных библиотек, таких как TensorFlow.

Рассмотрим архитектуру сети. Данные подаются на входной слой из 4 нейронов (по числу координат импульсного преобразователя). Первый скрытый слой содержит 64 нейрона с функцией активации ReLU (Rectified Linear Unit) и формулой активации  $\text{ReLU}(z) = \max(0, z)$ . ReLU используется для введения нелинейности в модель. Вероятность отключения нейронов в слое Dropout равна 0,2 (20 % нейронов случайно отключаются во время обучения для предотвращения переобучения). Второй скрытый слой содержит 32 нейрона с такой же функцией активации. Вероятность отключения Dropout также составляет 0,2. Третий скрытый слой содержит 16 нейронов с функцией активации ReLU. Выходными данными являются 2 коэффициента линейной комбинации переменных состояния объекта управления. Для обучения используем Adam – интеллектуальный оптимизатор, который сам подстраивает шаг обучения для каждого параметра, ускоряя сходимость и работая лучше обычного градиентного спуска [14, 15].

Результаты работы нейронной сети для проекции  $(x_2, x_4)$  представлены на рис. 6. Очевидно, что в сравнении с генетическим алгоритмом (см. рис. 5) область существования скользящего режима расширилась. Поэтому результат нейросетевой оптимизации следует считать весьма успешным.

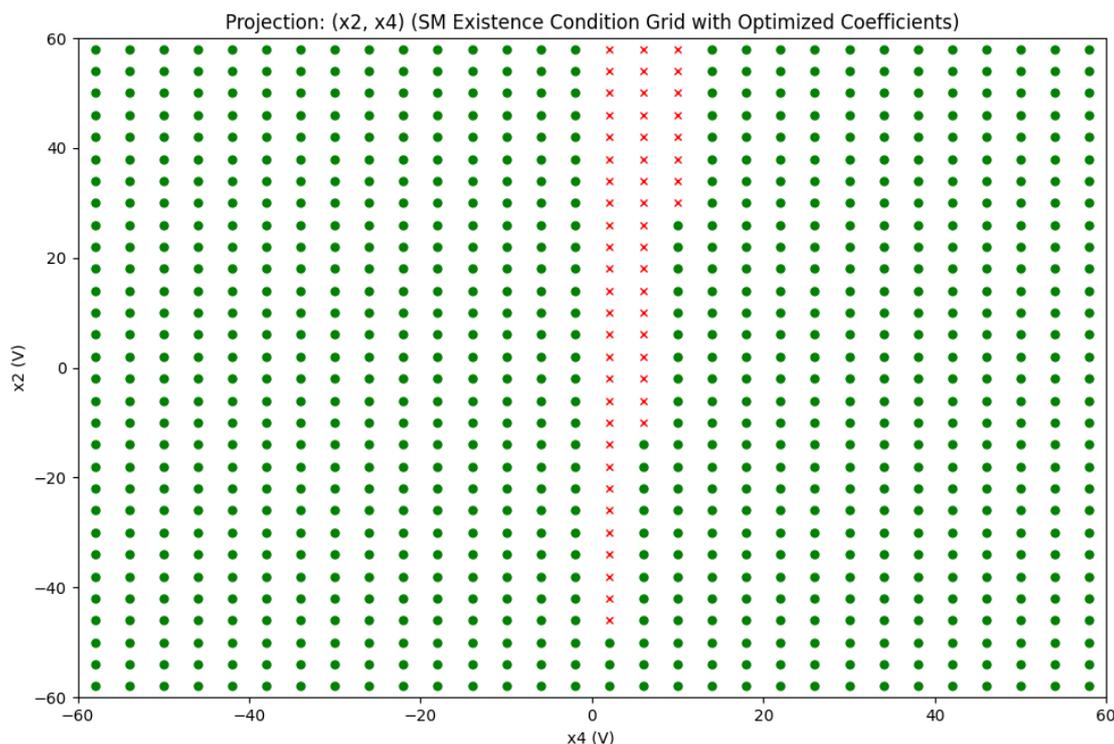


Рис. 6. Результаты нейросетевой оптимизации области существования скользящего режима в проекции  $(x_2, x_4)$  (зеленые точки – скользящий режим существует)

Fig. 6. Results of neural network optimization of the region of existence of the sliding mode in the projection  $(x_2, x_4)$  (green dots – the sliding mode exists)

Важно отметить, что линии скольжения строятся отдельно для каждой ячейки в каждой проекции фазового пространства. Это открывает возможность синтезировать сложные линии скольжения, обеспечивающие достижение нужных показателей качества в скользящем режиме, сочетая отдельные участки скольжения. В дальнейшем найденные кусочно-линейные функции можно аппроксимировать нелинейными функциями, используя, например, полиномиальные модели или нейронные сети с относительно простой структурой.

### Заключение

В работе предложен метод структурной классификации проекций фазового пространства с точки зрения их пригодности к организации управления в скользящем режиме. Его основу составляет оптимизация областей существования скользящего режима, что позволяет расширить возможности синтеза алгоритмов управления.

На примере импульсного преобразователя 4-го порядка рассмотрены особенности проекций фазовых пространств многомерных систем, а также ограничения, присущие таким проекциям с точки зрения синтеза законов управления. Продемонстрировано, что переход от многомерного фазового пространства к двумерным проекциям сопряжен с потерей части информации.

Рассмотрен способ формирования линий переключения для скользящего режима на основе проекций фазового пространства. Оптимизация параметров этих линий позволяет значительно увеличить потенциал синтеза алгоритмов управления.

Оптимизация параметров выполнена с помощью нейронной сети в виде многослойного персептрона с оптимизатором Adam. Также для сравнения проведена оптимизация методом дифференциальной эволюции (DE), представляющим собой стохастический метод глобальной оптимизации, эффективный в задачах с непрерывными параметрами. В обоих случаях результаты численной оптимизации в проекциях фазового пространства показали значительное расширение областей существования скользящего режима, что подтверждается численным моделированием для импульсного преобразователя 4-го порядка. В будущем представляет интерес исследование более сложных моделей, таких как рекуррентные и сверточные нейронные сети.

Таким образом, предложенный метод расширяет область применения проекций фазового пространства в задачах синтеза управления многомерными системами и открывает новые возможности для повышения эффективности управления в скользящих режимах.

### Список литературы/References

1. Zhao F., May J.A., Loh S.C. Controller Synthesis and Verification for Nonlinear Systems: A computational approach using phase-space geometric models. *IEEE Control Systems Magazine*. 1998;3:198–224.
2. Zhao F. Extracting and representing qualitative behaviors of complex systems in phase space. *Artificial Intelligence*. 1994;69(1–2):51–92. DOI: 10.1016/0004-3702(94)90078-7
3. Девятков М.А. Синтез систем управления на основе анализа геометрической структуры проекций фазовых пространств // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. 2006. № 1 (31). С. 83–87. [Devyatov M.A. [Synthesis of control systems by analyzing the geometric structure of phase space projections]. *Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2006;1(31):83–87. (In Russ.)]
4. Zhao F., Loh S.C., May J.A. Phase-Space Nonlinear Control Toolbox: The Maglev Experience. In: *5th International Hybrid Systems Workshop. Lecture Notes in Computer Science*. 1999. Vol. 1567. P. 429–444. DOI: 10.1007/3-540-49163-5\_23
5. Бобцов А.А., Ортега Р., Николаев Н.А., Слита О.В., Козачёк О.А., Ван Ч. Оценка переменных состояния математической модели конвертора Чука с частично неизвестными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 9. С. 451–458. [Bobtsov A.A., Ortega R., Nikolaev N.A., Slita O.V., Kozachek O.A., Wang C. Estimation of State Variables in the Ćuk Converter Mathematical Model with Partially Unknown Parameters. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, automation, control*. 2021;22(9):451–458. (In Russ.)] DOI: 10.17587/mau.22.451-458
6. Bandyopadhyay B., Deepak F., Kim K.-S. Sliding Mode Control Using Novel Sliding Surfaces. In: *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. 2009. Vol. 392. P. 1–146. DOI: 10.1007/978-3-642-03448-0
7. Sira-Ramirez H., Rios-Bolivar M. Sliding mode control of DC-to-DC power converters via extended linearization. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 2002;41(10):652–661. DOI: 10.1109/81.329725
8. Hušek P. Adaptive sliding mode control with moving sliding surface. *Applied Soft Computing*. 2016;42:178–183. DOI: 10.1016/j.asoc.2016.01.009
9. Utkin V. *Sliding Modes in Control and Optimization*. Springer-Verlag, Berlin; 1992. 286 p.
10. Alhijawi B., Awajan A. Genetic algorithms: theory, genetic operators, solutions, and applications. *Evolutionary Intelligence*. 2023;17:1245–1256. DOI: 10.1007/s12065-023-00822-6
11. Haykin S. *Neural networks: a comprehensive foundation*. Macmillian Publishing Company, Inc.; 1994. 823 p.
12. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. The MIT Press; 2010. 800 p.
13. Bisong E. The Multilayer Perceptron (MLP). In: *Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform*. Apress, Berkeley, CA; 2019. P. 401–405. DOI: 10.1007/978-1-4842-4470-8\_31
14. Kingma D., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015)*. 2015. P. 1–13.
15. Zhang Z. Improved Adam Optimizer for Deep Neural Networks. In: *IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*. Banff, AB, Canada; 2018. P. 1–2. DOI: 10.1109/IWQoS.2018.8624183

***Информация об авторах***

**Девятов Максим Александрович**, канд. техн. наук, доц. кафедры радиоэлектроники и систем связи, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; deviatovma@susu.ru.

**Угаров Павел Александрович**, канд. техн. наук, доц. кафедры радиоэлектроники и систем связи, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ugarovpa@susu.ru.

**Тележкин Владимир Федорович**, д-р. техн. наук, проф., проф. кафедры радиоэлектроники и систем связи, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; telezhkinvf@susu.ru.

***Information about the authors***

**Maksim A. Devyatov**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Radio Electronics and Communication Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; deviatovma@susu.ru.

**Pavel A. Ugarov**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Radio Electronics and Communication Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ugarovpa@susu.ru.

**Vladimir F. Telezhkin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Radio Electronics and Communication Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; telezhkinvf@susu.ru.

***Вклад авторов:*** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***Contribution of the authors:*** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

***Статья поступила в редакцию 10.03.2025***

***The article was submitted 10.03.2025***

# Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

Научная статья  
УДК 621.313  
DOI: 10.14529/ctcr250205

## ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ВЫСШИМ ГАРМОНИКАМ ТОКА МЕТОДОМ МАТРИЧНЫХ ПУЧКОВ

**А.Л. Шестаков**, [a.l.shestakov@susu.ru](mailto:a.l.shestakov@susu.ru)

**С.Г. Некрасов**, [nekrasovsg@susu.ru](mailto:nekrasovsg@susu.ru)

**В.А. Еремеева**, [eremeevava@susu.ru](mailto:eremeevava@susu.ru), <https://orcid.org/0009-0001-8284-1887>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Обрывы в короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного электродвигателя являются одной из причин преждевременного выхода из строя промышленного оборудования. Обрыв стержня ротора приводит к перегреву электродвигателя, повышению его вибрации и снижению эффективности работы. Классические методы диагностики дефектов ротора, основанные на обнаружении частотных составляющих около гармоники питания двигателя в спектрах тока, часто оказываются недостаточно точными из-за влияния различных маскирующих факторов, таких как присутствие шумов в сигналах тока, особенности конструкции ротора и изменение рабочих условий. **Цель исследования:** применить метод матричных пучков к сигналам тока электродвигателя для получения значений амплитуд и частот высших гармоник дефекта ротора в районе 5-й и 7-й гармоник питания. Высшие гармоники дефекта ротора менее подвержены влиянию маскирующих эффектов и являются более надёжными индикаторами неисправности ротора по сравнению с составляющими в районе основной гармоники питания. **Материалы и методы.** Метод матричных пучков имеет высокое спектральное разрешение и вычислительную эффективность по сравнению с методами спектрального анализа на основе преобразования Фурье. Дополнительная обработка сигналов тока, включающая их фильтрацию и демодуляцию на основе суммирования квадратов токов, позволяет повысить точность и надёжность обнаружения высших гармоник дефекта ротора. **Результаты.** Обработка реальных сигналов электропривода с дефектами ротора показала, что при увеличении нагрузки двигателя и прогрессировании дефекта амплитуды гармоник дефекта ротора также увеличиваются. Таким образом, данные параметры могут служить диагностическими признаками неисправности. Метод матричных пучков позволяет с достаточной точностью определить значения частот и амплитуд гармоник дефекта ротора при малой частоте дискретизации 100 Гц при длине сигнала 200 отсчетов. **Заключение.** Метод матричных пучков является эффективным инструментом для мониторинга состояния асинхронных электродвигателей, так как позволяет отслеживать как изменение частот дефектных гармоник, так и рост их амплитуд при развитии повреждения. Таким образом, метод матричных пучков может быть применен на практике для раннего обнаружения неисправностей асинхронного двигателя и предотвращения аварийных ситуаций.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, токовый сигнал, дефект стержня ротора, гармонический анализ, метод матричных пучков

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 25-29-00633, <https://rscf.ru/ru/project/25-29-00633/>.

**Для цитирования:** Шестаков А.Л., Некрасов С.Г., Еремеева В.А. Обнаружение дефектов ротора асинхронного двигателя по высшим гармоникам тока методом матричных пучков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 55–64. DOI: 10.14529/ctcr250205

## DETECTION OF ROTOR FAULTS IN INDUCTION MOTOR BY HIGHER CURRENT HARMONICS USING THE MATRIX PENCIL METHOD

A.L. Shestakov, [a.l.shestakov@susu.ru](mailto:a.l.shestakov@susu.ru)

S.G. Nekrasov, [nekrasovsg@susu.ru](mailto:nekrasovsg@susu.ru)

V.A. Ereemeeva, [eremeevava@susu.ru](mailto:eremeevava@susu.ru), <https://orcid.org/0009-0001-8284-1887>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** Broken rotor bars in the squirrel-cage winding of an induction motor are one of the causes of premature failure in industrial equipment. A broken rotor bar leads to motor overheating, increased vibration, and reduced operational efficiency. Conventional rotor fault diagnostic methods, based on detecting fault-related frequency components near the supply harmonic in current spectra, often prove insufficiently accurate due to various masking effects, such as current signal noise, rotor design peculiarities, and changing operating conditions. **The aim of the study:** to apply the Matrix Pencil Method (MPM) to motor current signals to extract the amplitudes and frequencies of higher-order rotor fault harmonics near the 5th and 7th supply harmonics. These higher-order rotor fault harmonics are less susceptible to masking effects and provide more reliable indicators of rotor faults compared to components near the fundamental supply frequency. **Materials and methods.** The Matrix Pencil Method offers superior spectral resolution and computational efficiency compared to Fourier transform-based spectral analysis techniques. Additional signal processing, including filtering and demodulation based on squared current summation, enhances the accuracy and reliability of detecting higher-order rotor fault harmonics. **Results.** The analysis of real motor current signals with rotor faults demonstrated that as motor load increases and the fault progresses, the amplitudes of rotor fault harmonics also rise. Thus, these parameters can serve as effective diagnostic indicators. The Matrix Pencil Method accurately determines the frequencies and amplitudes of rotor fault harmonics even at a low sampling rate of 100 Hz and a signal length of 200 samples. **Conclusion.** The Matrix Pencil Method is an effective tool for monitoring the condition of induction motors, as it tracks both the frequency shifts and amplitude growth of fault-related harmonics as the defect develops. Therefore, this method can be practically applied for early fault detection in induction motors, helping to prevent critical failures and unplanned downtime.

**Keywords:** squirrel cage induction motor, current signal, rotor bar defect, harmonic analysis, Matrix Pencil method

**Acknowledgments.** The research was funded by the Russian Science Foundation No. 25-29-00633, <https://rscf.ru/en/project/25-29-00633/>.

**For citation:** Shestakov A.L., Nekrasov S.G., Ereemeeva V.A. Detection of rotor faults in induction motor by higher current harmonics using the matrix pencil method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(2):55–64. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250205

### Введение

Работа металлургического оборудования обеспечивается десятками тысяч электродвигателей [1]. Как правило, большую часть электродвигателей составляют машины переменного тока, в частности асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. В металлургическом производстве электродвигатели работают в крайне тяжелых условиях эксплуатации: под воздействием высоких вибраций, с загрязнениями парами кислоты, окалиной, СОЖ. Данные факторы резко сокращают срок эксплуатации двигателя и повышают риск внезапного отказа. Поэтому важно контролировать фактическое состояние электродвигателей для предотвращения финансовых потерь из-за ремонтных простоев, а также для обеспечения безопасности производства.

Асинхронный двигатель состоит из статора, ротора и корпуса. Двигатели средней и большой мощности имеют сборную конструкцию ротора [2]. Обмотка сборного ротора представляет собой медные стержни, которые вставляются в пазы сердечника и припаиваются на каждом конце к замыкающему кольцу. Место пайки является слабым местом обмотки. Перегрев ротора из-за

пусковых токов, повышенная вибрация, перегруз двигателя могут привести к повреждению места пайки [3]. Обрыв одного стержня ротора почти не оказывает влияния на работу двигателя. Однако ток поврежденного стержня перераспределяется на соседние стержни, в результате чего происходит их локальный перегрев и последующее отгорание [4]. В результате двигатель не развивает требуемую скорость и момент, а его КПД падает на 13–20 % [4]. При обширном повреждении ротора двигатель выходит из строя. В некоторых случаях выступающий фрагмент отгоревшего стержня может повредить изоляцию обмотки статора, что приведет к аварийному отключению двигателя [5].

Принцип работы асинхронного двигателя основан на вращающемся магнитном поле, вызванном переменными токами в обмотках статора. Обрыв стержня ротора вызывает появление магнитного поля, вращающегося в обратном направлении относительно общего поля машины [6]. Магнитное поле, вызванное дефектом, модулирует токи статора двигателя низкочастотной составляющей, равной

$$f_{BB} = 2sf_{\text{пит}} / p,$$

где  $f_{BB}$  – частота дефекта;  $s$  – скольжение двигателя;  $f_{\text{пит}}$  – частота питания двигателя;  $p$  – число пар полюсов двигателя.

В связи с этим традиционный способ обнаружения сломанных стержней ротора основан на частотном анализе токов двигателя и поиске гармоник дефекта ротора вокруг основной гармоники питания. Примерами подобных методов являются метод сигнатурного анализа тока двигателя (MCSA) [7] и векторный метод Парка [8]. Однако существуют эффекты, которые затрудняют обнаружение низкочастотной составляющей дефекта около основной гармоники питания. Данные эффекты включают наличие осевых воздухопроводов в роторе, низкочастотные колебания нагрузки, магнитную анизотропию материалов сердечника [9–11]. Эти эффекты генерируют гармоники в сигналах тока в том же частотном диапазоне, что и сломанный стержень ротора. Поэтому использование классических методов частотного анализа на основе преобразования Фурье может привести к неверной оценке технического состояния двигателя. Кроме того, методы на основе Фурье работают только со стационарными сигналами. Нестационарные режимы работы двигателя, такие как работа с переменной частотой вращения или работа под векторным управлением, приводят к размытию частотного спектра и невозможности обнаружения гармоник дефекта [9].

Для решения проблемы анализа нестационарных сигналов разработан ряд частотных методов высокого разрешения, например, алгоритм классификации множественных сигналов MUSIC [12], алгоритм инвариантного вращения подпространства ESPRIT [13], метод Прони [14] и другие. Так, метод Прони позволяет получить информацию о гармоническом составе сигналов очень малой длительности, что позволяет реализовать анализ нестационарных сигналов. В литературе известны работы по применению метода Прони в задачах контроля состояния энергетических систем. Однако точность извлеченных параметров методом Прони резко уменьшается с увеличением шума в сигналах [14]. Поэтому исследовательский интерес представляет метод, который является развитием метода Прони, – метод матричных пучков [15, 16]. Метод матричных пучков позволяет получить оценки параметров гармоник в зашумленных сигналах с достаточной для задач диагностики точностью [14]. При этом вычислительная эффективность алгоритма матричных пучков в 5,7 раза выше, чем у алгоритмов MUSIC и ESPRIT [17].

В данной статье предлагается диагностика состояния ротора по параметрам высших гармоник дефекта в токе двигателя. Для извлечения частоты и амплитуды гармоник дефекта к сигналам тока применяется метод матричных пучков. Сигналы тока двигателя дополнительно подвергаются фильтрации и демодуляции для улучшения информативности и повышения вероятности обнаружения гармоник дефекта ротора. Предлагаемый метод тестируется на сигналах реального электропривода, работающего при разных уровнях нагрузки.

## 1. Методы и материалы

### 1.1. Высшие гармоники дефекта ротора

Обрыв стержня ротора вызывает появление двух боковых гармоник, расположенных симметрично около частоты питания двигателя (рис. 1а).

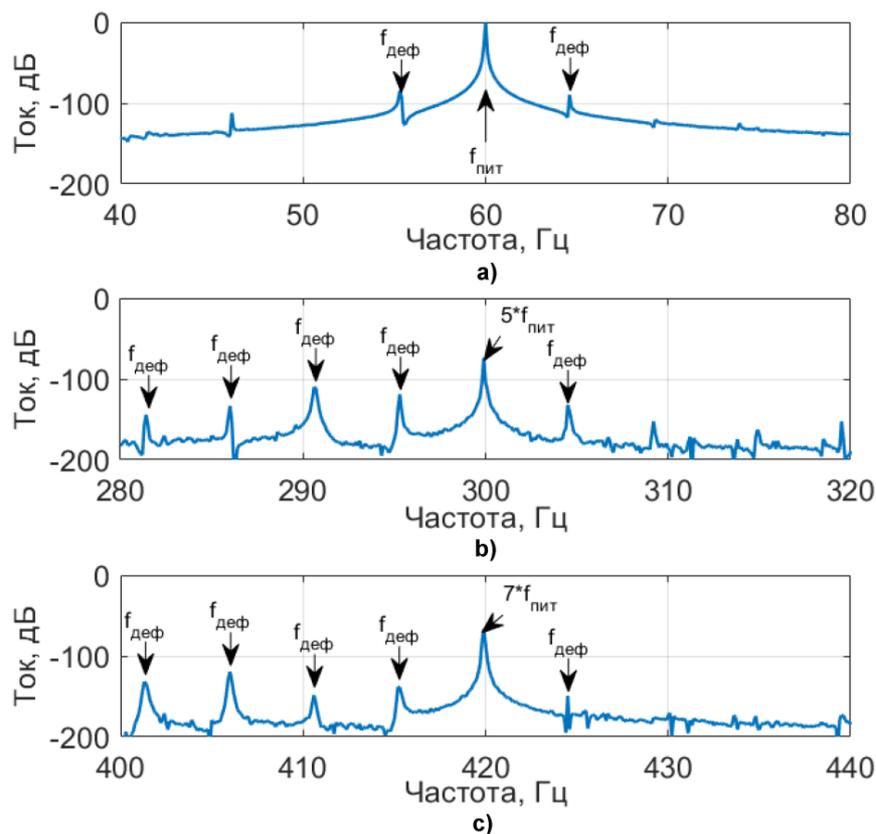


Рис. 1. Спектр тока с 1 сломанным стержнем при частоте питания 60 Гц:  
а – в районе основной гармоники питания; б – в районе 5-й гармоники  
питания; с – в районе 7-й гармоники питания

Fig. 1. Current spectrum with 1 broken bar at a power supply frequency of 60 Hz:  
a – in the region of the fundamental power supply harmonic; b – in the region  
of the 5th power supply harmonic; c – in the region of the 7th power supply  
harmonic

Амплитуды гармоник зависят от степени тяжести дефекта, поэтому, контролируя их величины, можно оценивать состояния ротора. В случае исправного двигателя также возможно присутствие данных гармоник с небольшой амплитудой. Их наличие объясняется внутренними конструктивными несимметриями, вызванными при изготовлении и сборке двигателя.

Дефект ротора также вызывает модуляцию других гармоник тока двигателя: пространственных гармоник магнитодвижущей силы порядка  $\mu = 6i \pm 1$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) и временных ШИМ-гармоник в случае питания двигателя от частотного преобразователя [18]. Новые гармоники дефекта определяются по формулам:

$$f_{\mu} = (\mu(1-s) \pm s)f_{\text{пит}}/p, \quad (\mu = 5, 7);$$

$$f_u = (u \pm 2ks)f_{\text{пит}}/p, \quad (u = 5, 7; k = 1, 2, \dots),$$

где  $f_{\mu}$  – составляющие дефекта, модулирующие гармоники магнитодвижущей силы;  $f_u$  – составляющие дефекта, модулирующие временные ШИМ-гармоники.

Совокупность  $f_{\mu}$  и  $f_u$  образует «гребенку» из гармоник в спектре тока в районе 5-й и 7-й частоты питания (рис. 1б, с). Далее в тексте данные гармоники упоминаются как «высшие гармоники дефекта». Отношение амплитуд высших гармоник дефектов к амплитуде гармонике питания выше, чем в диапазоне основной частоты питания. Также в исследованиях [19, 20] отмечено, что низкочастотные колебания нагрузки и магнитная анизотропия ротора гораздо слабее влияют на состав тока в районе высших гармоник по сравнению с диапазоном основной частоты питания. Следовательно, обнаружение высших гармоник дефекта ротора в спектре тока является более надежным методом диагностики состояния двигателя.

### 1.2. Фильтрация и демодуляция сигналов тока двигателя

Гармоники дефекта  $f_{BB}$ ,  $f_u$  и  $f_n$  зависят от скольжения, а значит, и от нагрузки двигателя. При малой нагрузке гармоники дефекта могут слиться с гармоникой питания, в результате чего их будет сложно обнаружить. Для улучшения обнаружения гармоник дефекта в некоторых методах предлагается удалять гармонику питания из сигналов тока. Примерами подобных методов являются амплитудная демодуляция сигнала преобразованием Гильберта [21] и преобразование Парка – Кларка [22]. В работе [23] показано, что сигналы тока, полученные с применением данных методов, являются более информативными с точки зрения обнаружения дефекта ротора. Однако авторы работы [23] показали, что суммирование квадратов трех сигналов тока позволяет получить демодулированный сигнал с меньшим уровнем шума по сравнению с преобразованием Гильберта. Кроме того, такой подход является более быстрым в вычислении, чем преобразование Парка – Кларка.

В данной статье метод демодуляции применяется к сигналам тока, отфильтрованным в районе 5-й и 7-й гармоник питания, для получения сигналов  $i_{\text{демод1}}(t)$  и  $i_{\text{демод2}}(t)$  по формулам:

$$i_{\text{демод1}}(t) = \frac{i_{A\_фил5}^2(t) + i_{B\_фил5}^2(t) + i_{C\_фил5}^2(t)}{3}; \quad i_{\text{демод2}}(t) = \frac{i_{A\_фил7}^2(t) + i_{B\_фил7}^2(t) + i_{C\_фил7}^2(t)}{3},$$

где  $i_{A\_фил5}(t)$ ,  $i_{B\_фил5}(t)$ ,  $i_{C\_фил5}(t)$ ,  $i_{A\_фил7}(t)$ ,  $i_{B\_фил7}(t)$ ,  $i_{C\_фил7}(t)$  – отфильтрованные сигналы тока с помощью полосовых фильтров с частотами пропускания не менее  $[5f_{\text{пит}} - k \cdot f_{BB1}; 5f_{\text{пит}} + k \cdot f_{BB1}]$  и  $[7f_{\text{пит}} - k \cdot f_{BB1}; 7f_{\text{пит}} + k \cdot f_{BB1}]$  соответственно, где  $k$  – число анализируемых гармоник дефекта.

После фильтрации и демодуляции сигналы  $i_{\text{демод1}}(t)$  и  $i_{\text{демод2}}(t)$  в основном будут содержать низкочастотные гармоники дефекта ротора (рис. 2). Преимущество данного подхода заключается в учете особенностей всех трех токов двигателя, а также в снижении уровня случайного шума за счет фильтрации и усреднения сигналов.

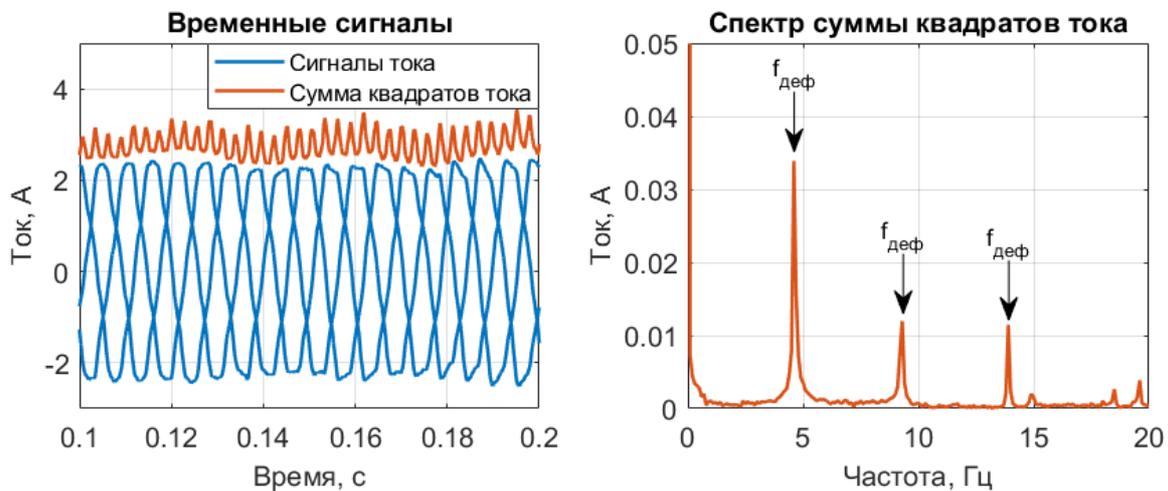


Рис. 2. Демодулированный сигнал тока со сломанным стержнем  
Fig. 2. Demodulated current signal with broken rotor bar

### 1.3. Метод матричных пучков

Метод матричных пучков является параметрическим методом спектрального анализа, который позволяет анализировать гармонический состав дискретного сигнала  $y(n)$  на основе его аппроксимирующей модели  $\hat{y}(n)$ , состоящей из суммы комплексных экспонент [16]:

$$\hat{y}(n) = \sum_{k=1}^M A_k e^{j2\pi f_k n T + j\theta_k} = \sum_{k=1}^M R_k z_k^n,$$

где  $M$  – число экспонент аппроксимирующей модели;  $0 \leq n \leq N-1$  – номер отсчета;  $T$  – период дискретизации сигнала;  $A_k$ ,  $f_k$  и  $\theta_k$  – амплитуда, частота и начальная фаза  $k$ -й комплексной экспо-

ненты;  $R_k = A_k e^{j\varphi_k}$  – комплексная амплитуда  $k$ -й экспоненты;  $z_k = e^{j2\pi f_k n T}$  – комплексная экспонента (комплексный полюс).

Метод матричных пучков позволяет найти амплитуду, частоту и фазу интересующих гармоник сигнала по оценкам его комплексных полюсов  $z_k$  и комплексных амплитуд  $R_k$ . Более подробно алгоритм описан в [16]. В данной статье метод матричных пучков используется для нахождения частот и амплитуд гармоник дефекта ротора из демодулированных сигналов тока  $i_{\text{демод1}}(t)$  и  $i_{\text{демод2}}(t)$ . Для реальных данных количество гармоник дефекта  $k$  может варьироваться от 2 до 5 в зависимости от типоразмера двигателя. В данной статье анализируются параметры первых трех гармоник дефекта:  $f_{BB1} = 2s \cdot f_{\text{пит}}$ ,  $f_{BB2} = 4s \cdot f_{\text{пит}}$  и  $f_{BB3} = 6s \cdot f_{\text{пит}}$ .

## 2. Эксперимент

Для тестирования предложенного метода взяты данные университета Сан-Паулу (Бразилия), полученные на экспериментальном стенде в лаборатории интеллектуальной автоматизации процессов и систем [24]. Экспериментальный стенд состоит из четырехполюсного асинхронного двигателя, датчика момента, двигателя постоянного тока для создания момента нагрузки (рис. 3). Параметры трехфазного асинхронного двигателя W22 WEG приведены в таблице.



Рис. 3. Экспериментальный стенд лаборатории Сан-Паулу [24]  
 Fig. 3. Experimental rig of the Sao Paulo laboratory [24]

Параметры двигателя W22 WEG  
 W22 WEG motor parameters

Мощность $P$ , кВт	0,74
Напряжение питания $U$ , В	220/380
Частота поля $n_1$ , об/мин	1800
Частота вращения ротора $n_2$ , об/мин	1715
Номинальный момент, Н·м	4,1
Количество стержней ротора, шт.	34

Данные получены для исправного двигателя, двигателя с 1, 2, 3 и 4 стержнями, сломанными рядом друг с другом. Для имитации сломанных стержней в роторе просверлены отверстия с помощью дрели, оснащенной сверлом диаметром 6 мм. Эксперимент проведен при частоте питания 60 Гц и при разных уровнях нагрузки: 1,0; 2,0; 3,0 и 4,0 Н·м, что соответственно составляет 5; 50; 75 и 100 % нагрузки от номинальной. В данной статье использованы три сигнала фазных токов, а также сигнал виброускорения с акселерометра, установленного на корпусе двигателя, для получения информации о частоте вращения электропривода. Для измерения сигналов тока использованы токовые клещи Yokogawa 96033, для измерения вибрации использован акселерометр Vibrocontrol PU 2001. Частота дискретизации сигналов тока равна 50 кГц, частота дискретизации сигнала вибрации равна 7,6 кГц. Длительность сигналов составляет около 18 с.

### 3. Результаты

По сигналам вибрации получены значения частоты вращения двигателя и расчетные значения гармоник дефектов ротора. Самое большое значение частоты гармоники дефекта составило 4,88 Гц. В связи с этим полосы пропускания фильтров для получения отфильтрованных сигналов в районе 5-й и 7-й частоты питания выбраны равными [285; 315] и [405; 435] Гц соответственно. В качестве фильтров выбраны эллиптические БИХ-фильтры 10-го порядка. Отфильтрованные сигналы тока возведены в квадрат и суммированы для получения демодулированных сигналов  $i_{\text{демод1}}(t)$  и  $i_{\text{демод2}}(t)$ . Поскольку демодулированные сигналы содержат только низкочастотные гармоники дефекта ротора, частота дискретизации сигналов может быть понижена с 50 кГц до 100 Гц. Пример демодулированных сигналов для двигателя с 4 сломанными стержнями и 100%-ной нагрузкой приведен на рис. 4.

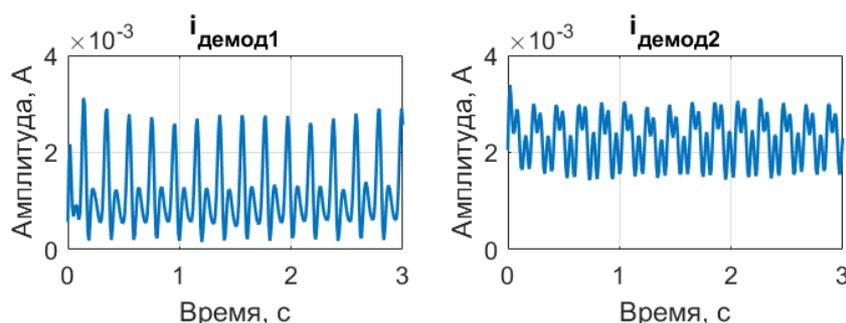


Рис. 4. Демодулированные сигналы тока  
Fig. 4. Demodulated current signals

Полученные демодулированные сигналы обработаны методом матричных пучков в режиме скользящего окна, т. е. берется некоторое количество отсчетов сигнала, на их основе находятся параметры интересующих гармоник, затем «окно обработки» сдвигается на 1 отсчет и процедура повторяется. Длина окна выбрана равной 200 отсчетам, что соответствует 2 с сигнала. Число комплексных экспонент  $M$  для аппроксимирующей модели метода матричных пучков выбрано равным 6, так как необходимо найти параметры первых трех гармоник дефекта. Пример полученных параметров гармоники дефекта для исправного двигателя и двигателя с четырьмя сломанными стержнями с нагрузкой 100 % приведен на рис. 5.

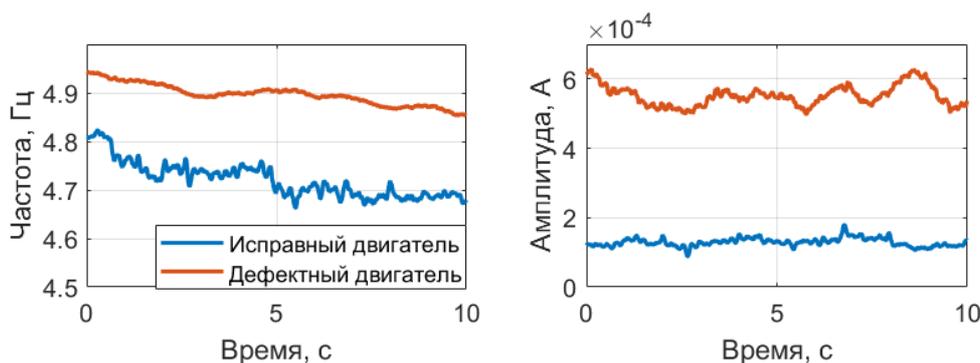


Рис. 5. Параметры гармоники дефекта  $f_{BB1}$  для демодулированного сигнала  $i_{\text{демод1}}(t)$   
Fig. 5. Parameters of the defect harmonic  $f_{BB1}$  for the demodulated signal  $i_{\text{демод1}}(t)$

Видно, что частота гармоники дефекта незначительно увеличивается при наличии дефекта ротора. Однако ее амплитуда вырастает более чем в 4 раза по сравнению с исправным двигателем. Анализ полученных параметров гармоник дефектов для всех режимов работы двигателя показал, что вторая гармоника дефекта  $f_{BB2} = 4s \cdot f_{\text{пит}}$  для сигнала  $i_{\text{демод1}}(t)$  и третья гармоника дефекта  $f_{BB3} = 6s \cdot f_{\text{пит}}$  для сигнала  $i_{\text{демод2}}(t)$  позволяют наиболее достоверно определить состояние двигателя. Средние значения амплитуд данных гармоник для всех режимов работы двигателя приведены на рис. 6.

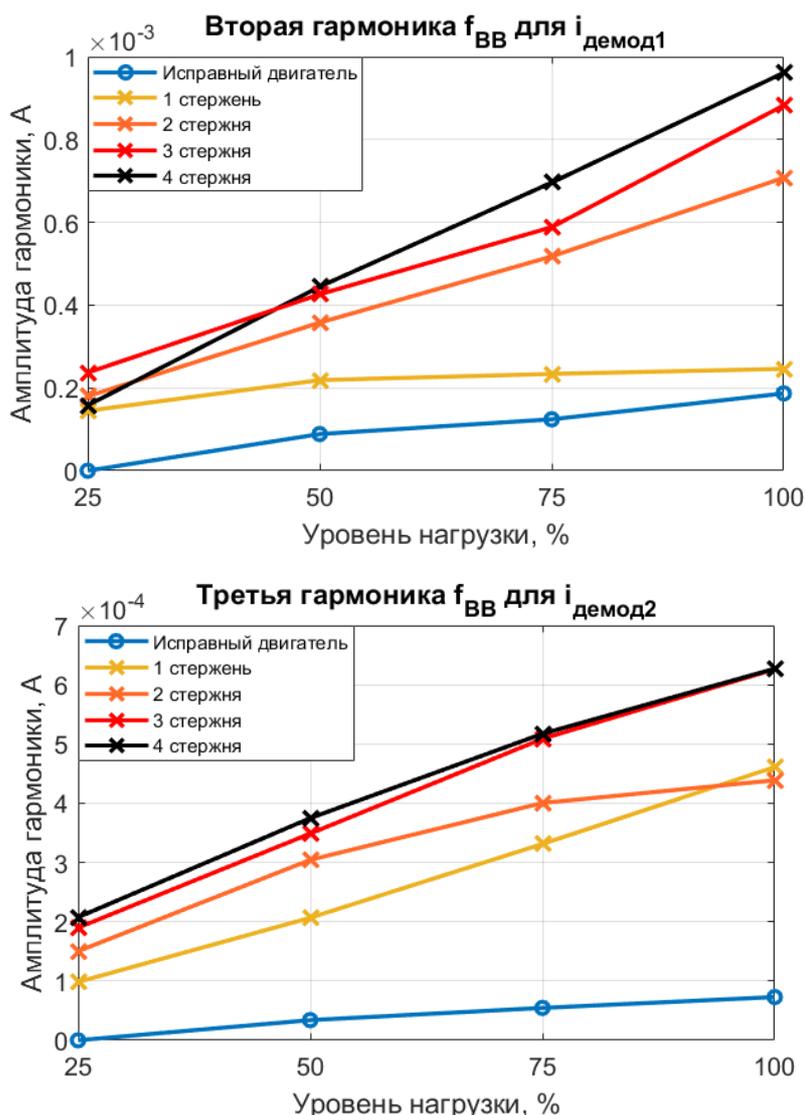


Рис. 6. Изменение амплитуд гармоник дефекта ротора при смене режима работы двигателя  
Fig. 6. Change in the amplitudes of rotor defect harmonics when changing the motor operating mode

Из рис. 6 видно, что средние значения амплитуд гармоник дефекта растут с увеличением степени повреждения ротора. Также амплитуда гармоник дефекта зависит от уровня нагрузки двигателя. Наибольшая разница между значением амплитуды при исправном состоянии двигателя и дефектном достигается на нагрузке 100 %. Поэтому надежней всего диагностировать состояние двигателя, когда он полностью нагружен. Тем не менее параметры гармоник дефекта, извлеченные предложенным методом, позволяют однозначно отличить исправное состояние двигателя от состояния двигателя с поврежденным ротором.

### Заключение

Использование амплитуд высших гармоник дефекта ротора, извлеченных из демодулированных сигналов тока, позволяет определить наличие сломанных стержней в роторе асинхронного двигателя. Анализ тока статора в районе 5-й и 7-й гармоник тока обеспечивает более надежное извлечение признаков дефекта из сигналов по сравнению с классическим подходом, так как в этих частотных диапазонах многие маскирующие эффекты оказывают меньшее влияние. Демодуляция с помощью суммирования квадратов фазных токов также позволяет повысить информативность сигналов для обнаружения гармоник дефекта ротора, а также учесть особенности всех трех токов двигателя. Обработка полученных демодулированных сигналов тока методом матричных пучков позволяет получить параметры гармоник дефектов ротора даже при изменении нагрузки двигателя.

### Список литературы/References

1. Петушков М.Ю., Сарваров А.С., Федоров О.В. Пути решения проблем в области нерегулируемого асинхронного электропривода в металлургической промышленности // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 3. С. 60–74. [Petushkov M.Y., Sarvarov A.S., Fedorov O.V. Ways to solve problems in field of unregulated asynchronous electric drive in metallurgical industry. *Smart Electrical Engineering*. 2019;3:60–74. (In Russ.)]. DOI: 10.46960/2658-6754\_2019\_3\_60
2. Bonnett A.H., Albers T. Squirrel cage rotor options for AC induction motors. In: *Conference Record of 2000 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No.00CH37111)*/ Atlanta, GA, USA; 2000. P. 54–67. DOI: 10.1109/PAPCON.2000.854190
3. Zhang P., Du Y., Habetler T.G., Lu B. A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2011;47(1):34–46. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316083
4. Garcia M., Panagiotou P.A., Antonino-Daviu J.A., Gyftakis K.N. Efficiency Assessment of Induction Motors Operating Under Different Faulty Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;66(10):8072–8081. DOI: 10.1109/TIE.2018.2885719
5. Yang C., Lee S.B., Jang G., Kim S., Jung G., Lee J., Shim S., Lim Y.K., Kim J., Park S. Starting current analysis in medium voltage induction motors: detecting rotor faults and reactor starting defects. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2019;25(6):69–79. DOI: 10.1109/MIAS.2019.2923105
6. Вольдек, А.И. Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. Л.: Энергия, 1978. 832 с. [Voldek, A.I. *Elektricheskie mashiny: ucheb. dlya studentov vyssh. tekhn. ucheb. zavedeniy* [Electric machine. Textbook for students of higher technical educational institutions]. Leningrad: Energiya; 1978. 832 p. (In Russ.)].
7. Kliman G.B., Stein J. Methods of motor current signature analysis. *Electric Machines and Power Systems*. 1992;20(5):463–474. DOI: 10.1080/07313569208909609
8. Marques Cardoso A.J., Cruz S.M.A., Fonseca D.S.B. Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1999;14(3):595–598. DOI: 10.1109/60.790920
9. Lee S.B., Hyun D., Kang T., Yang C., Shin S., Kim H., Park S., Kong T., Kim H. Identification of false rotor fault indications produced by online MCSA for medium-voltage induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016;52(1):729–739. DOI: 10.1109/TIA.2015.2464301
10. Benbouzid M.E.H., Kliman G.B. What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis? *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2003;18(2):238–244. DOI: 10.1109/TEC.2003.811741
11. Kim J., Shin S., Lee S.B., Gyftakis K.N., Drif M., Cardoso A.J.M. Power spectrum-based detection of induction motor rotor faults for immunity to false alarms. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2015;30(3):1123–1132. DOI: 10.1109/TEC.2015.2423315
12. Morinigo-Sotelo D., Romero-Troncoso R.J., Antonino-Daviu J.A., Gyftakis K.N. Reliable detection of broken rotor bars in induction motors via MUSIC and ZSC methods. In: *Proceedings of the 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Lausanne, Switzerland; 2016. P. 2881–2886. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732932
13. Xu B., Sun L., Xu L., Xu G. Improvement of the Hilbert method via esprit for detecting rotor fault in induction motors at low slip. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2013;28(1):225–233. DOI: 10.1109/TEC.2012.2236557
14. Grant L.L., Crow M.L. Comparison of Matrix Pencil and Prony methods for power system modal analysis of noisy signals. In: *Proceedings of 2011 North American Power Symposium*. Boston, USA. 2011. P. 1–7. DOI: 10.1109/NAPS.2011.6024892
15. Ибряева О.Л., Салов Д.Д. Модификация метода матричных пучков, использующая совместное оценивание полюсов сигнала и обратных к ним // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». 2017. Т. 6, № 1. С. 26–37. [Ibryaeva O.L., Salov D.D. Modification of the Matrix Pencil Method using a combined evaluation of signal poles and their inverses. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computational Mathematics and Software Engineering*. 2017;6(1):26–37. (In Russ.)]. DOI: 10.14529/cmse170102
16. Генри М.П., Ибряева О.Л., Салов Д.Д., Семенов А.С. Метод матричных пучков для оценки параметров векторных процессов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование

и программирование». 2017. Т. 10, № 4. P. 92–104. [Henry M.P., Ibryaeva O.L., Salov D.D., Semenov A.S. Matrix pencil method for estimation of parameters of vector processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. 2017;10(4):92–104. (In Russ.)]. DOI: 10.14529/mmp170409

17. Chahine K. Rotor fault diagnosis in induction motors by the matrix pencil method and support vector machine. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2017;28(10):1–13. DOI: 10.1002/etep.2612

18. Tang J., Yang Y., Chen J., Qiu R., Liu Z. Characteristics analysis and measurement of inverter-fed induction motors for stator and rotor fault detection. *Energies*. 2019;13(1):101. DOI: 10.3390/en13010101

19. Kim H., Lee S.B., Park S., Kia S.H., Capolino G.-A. Reliable detection of rotor faults under the influence of low-frequency load torque oscillations for applications with speed reduction couplings. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016;52(2):1460–1468. DOI: 10.1109/TIA.2015.2508423

20. Shin S., Kim J., Lee S.B., Lim C., Wiedenbrug E.J. Evaluation of the influence of rotor magnetic anisotropy on condition monitoring of 2 pole induction motors. In: *Proceedings of 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Pittsburgh, USA. 2014. P. 638–645. DOI: 10.1109/ECCE.2014.6953455

21. Abd-el-Malek M.B., Abdelsalam A.K., Hassan O.E. Novel approach using Hilbert Transform for multiple broken rotor bars fault location detection for three phase induction motor. *ISA Transactions*. 2018;80:439–457. DOI: 10.1016/j.isatra.2018.07.020

22. Gyftakis K.N., Marques Cardoso A.J., Antonino-Daviu J.A. Introducing the Filtered Park's and Filtered Extended Park's Vector Approach to detect broken rotor bars in induction motors independently from the rotor slots number. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017;93:30–50. DOI: 10.1016/j.ymsp.2017.01.046

23. Chen J., Hu N., Zhang L., Chen L., Wang B., Zhou Y. A method for broken rotor bars diagnosis based on sum-of-squares of current signals. *Applied Sciences*. 2020;10(17):5980. DOI: 10.3390/app10175980

24. Treml A.E., Flauzino R.A., Suetake M., Maciejewski N.A.R. Experimental database for detecting and diagnosing rotor broken bar in a three-phase induction motor. *IEEE Dataport*. 2020. DOI: 10.21227/fmm-bn95

#### **Информация об авторах**

**Шестаков Александр Леонидович**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; a.l.shestakov@susu.ru.

**Некрасов Сергей Геннадьевич**, д-р техн. наук, проф. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; nekrasovsg@susu.ru.

**Еремеева Виктория Александровна**, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; eremeevava@susu.ru.

#### **Information about the authors**

**Alexander L. Shestakov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Information and Measurement Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; a.l.shestakov@susu.ru.

**Sergey G. Nekrasov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Information and Measurement Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; nekrasovsg@susu.ru.

**Victoria A. Eremeeva**, Postgraduate student of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; eremeevava@susu.ru.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

**Статья поступила в редакцию 13.11.2024**

**The article was submitted 13.11.2024**

## ROTARY ANGLE SENSOR FOR MONITORING THE POSITION OF ACTUATORS

I.P. Zaitsev<sup>1</sup>, zaitsev@skbind.ru

D.A. Katcai<sup>2</sup>, katcaida@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2895-7277>

S.N. Ryzhov<sup>1</sup>, market@skbind.ru

<sup>1</sup> Specialized Design Bureau “Induction”, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The reliability of actuators is determined by the criteria of limit states, which are assessed by different types of sensors. The reliability of sensors depends on their design properties, features of technological support of their quality in the manufacturing process. The angular position of the rotary links of actuators is determined by different types of sensors, including rotary angle sensors. A non-contact sensor is considered. The sensor operation is based on the Hall measurement principle, which ensures its structural simplicity, reliability and long service life. The accuracy characteristics of the sensor are determined by manufacturing errors of its individual parts. **The purpose of the study** is to develop a model of sensor error depending on manufacturing inaccuracies of the permanent magnet, which is part of its primary measuring transducer. **Materials and Methods.** The rotary angle sensor manufactured by Specialized Design Bureau “Induction” has been chosen as a prototype, during the production of which deviations in its technical characteristics caused by defects in the permanent magnets have been detected. The methods used in the paper include theoretical mechanics, calculation of electric and magnetic circuits, and numerical modelling. The calculations have been performed for a cylindrical permanent magnet with radial magnetization, wherein the magnetization vector is shifted in the radial direction. To perform the error calculations, the schemes of the arrangement of defective magnets relative to the magnetization vector of the external field created by additional magnets have been used. The coaxial arrangement of additional magnets is ensured by arranging them in coaxial cylindrical guides. **Results.** Analytical dependencies that relate the displacement of the magnet dipole relative to its geometric centre with the error in determining the rotary angle have been presented. The sensor errors have been shown in sketches of the primary measuring transducer in various positions of the magnet relative to the Hall elements in the primary transducer. **Conclusion.** The research results can be used in engineering facilities that allows for a quantitative assessment of the radial displacement of the magnetic dipole relative to the geometric centre of the magnet. The practical significance of the results lies in the rejection of permanent magnets at the stage of incoming inspection of the permissible displacement of the magnetic dipole relative to its geometric centre.

**Keywords:** sensor, sensitive element, Hall effect, magnetic dipole offset, error model

**For citation:** Zaitsev I.P., Katcai D.A., Ryzhov S.N. Rotary angle sensor for monitoring the position of actuators. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(2):65–73. DOI: 10.14529/ctcr250206

Научная статья  
УДК 681.518.22  
DOI: 10.14529/ctcr250206

## ДАТЧИК УГЛА ПОВОРОТА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

И.П. Зайцев<sup>1</sup>, [zaytsev@skbind.ru](mailto:zaytsev@skbind.ru)

Д.А. Кацай<sup>2</sup>, [katcaida@susu.ru](mailto:katcaida@susu.ru), <https://orcid.org/0009-0003-2895-7277>

С.Н. Рыжов<sup>1</sup>, [market@skbind.ru](mailto:market@skbind.ru)

<sup>1</sup> Специализированное конструкторское бюро «Индукция», Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Надежность работы исполнительных устройств определяется критериями предельных состояний, которые оцениваются различными типами датчиков. Надежность датчиков зависит от их конструктивных свойств, особенностей технологического обеспечения их качества в процессе производства. Угловое положение поворотных звеньев исполнительных механизмов определяется различными типами датчиков, в том числе датчиками угла поворота. Рассматривается датчик бесконтактного типа. Работа датчика основана на принципе измерения Холла, что обеспечивает его конструктивную простоту, надежность и длительный срок службы. Точностные характеристики датчика определяются погрешностями изготовления его отдельных частей. **Цель исследования:** разработать модель погрешности датчика в зависимости от неточностей изготовления постоянного магнита, входящего в состав его первичного измерительного преобразователя. **Материалы и методы.** В качестве прототипа выбран датчик угла поворота производства СКБ «Индукция», в процессе производства которого обнаружены отклонения его технических характеристик, вызванные дефектами постоянных магнитов. В работе использованы методы теоретической механики, расчета электрических и магнитных цепей, численного моделирования. Расчеты проведены для постоянного магнита цилиндрической формы с радиальной намагниченностью, при этом вектор намагниченности смещен в радиальном направлении. Для выполнения расчетов погрешностей использованы схемы расположения дефектных магнитов относительно вектора намагниченности внешнего поля, создаваемого дополнительными магнитами. Соосное расположение дополнительных магнитов обеспечивается путем расположения их в соосных цилиндрических направляющих. **Результаты.** Приводятся аналитические зависимости, связывающие смещение диполя магнита относительно его геометрического центра с погрешностью определения угла поворота. Погрешности датчика представлены на эскизах первичного измерительного преобразователя в различных положениях магнита относительно элементов Холла в первичном преобразователе. **Заключение.** Результаты исследования могут быть использованы в технологической оснастке, позволяющей дать количественную оценку величины радиального смещения магнитного диполя относительно геометрического центра магнита. Практическая значимость результатов состоит в отбраковке постоянных магнитов на этапе входного контроля допустимого смещения магнитного диполя относительно его геометрического центра.

**Ключевые слова:** датчик, чувствительный элемент, эффект Холла, смещение магнитного диполя, модель погрешностей

**Для цитирования:** Zaitsev I.P., Katcai D.A., Ryzhov S.N. Rotary angle sensor for monitoring the position of actuators // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 65–73. DOI: 10.14529/ctcr250206

### Introduction

The rotary angle sensor [1] is designed to measure angular positions, coordinates of rotating drive elements, for example, on autonomous mobile equipment, in cranes, excavators, ships, offshore platforms, mobile and stationary waste compactors, controllers of controlled valves, as well as in robotics, on wind turbines, in large medical devices. In the listed objects, mathematical models of individual mechanisms can be represented in the form of manipulators with rotary joints, for which there is an analytical solution to the first problem of dynamics [2].

Analysis of the market and development trends of global sensor technology over the past 15 years clearly show that significant changes in directions and a reorientation of consumer interests in the area of application of precise position sensors are taking place in industrial automation and electric drives<sup>1</sup>.

Until the beginning of the 21st century, optical rotary sensors (encoders), both incremental and absolute, both single-turn and multi-turn, occupied a dominant position in precision controlled drives. The mass demand for such encoders was facilitated by automation of production, digitalization of industry and control systems.

However, even mass production of optical encoders has not led to a reduction in prices for these devices. Approximate prices for absolute multi-turn encoders of the most popular sizes (with built-in digital interfaces such as Profibus, Ethernet, AS-i<sup>2</sup> and others) do not fall below the range of 1,000 to 2,000 Euros per encoder. For encoders for special and specialized applications (for explosion-hazardous areas, for industrial safety systems), the above prices should be multiplied by an increasing coefficient of 2 to 3.

There are two significant reasons for the high prices of optical encoders: complex and therefore expensive technology for manufacturing the code disk for the encoder, especially the multi-bit small-sized disk of the absolute encoder; complex and expensive technology for manufacturing the optical systems of absolute encoders. It is possible that the Kondratiev development cycle<sup>3</sup> for optical encoders is ending or has already ended [3]. New technologies are replacing encoders, in particular, the technology of precise magnetic measurements of the rotary angle, which is initially based on the technology of large integrated circuits.

This hypothesis is supported by the fact that magnetic encoders have come very close to the parameters of the best optical encoders in recent years, while the prices of magnetic encoders are many times lower. The magnetic encoder does not have the most expensive elements inherent in optics: a code disk and precise optical-mechanical elements, which significantly simplifies the design of the position sensor. Good accuracy and low price of a magnetic sensor may lead to the fact that in the foreseeable future the optical encoder will be forced out of the market.

Solutions for increasing the accuracy of angle sensors are known. In the 1979 author's certificate [4], a method and design of a shaft angle sensor for increasing the resolution capacity on technologies that are significantly inferior to modern capabilities are proposed. In the patent for invention [5], the accuracy is increased by complicating the design of the angular displacement sensor. In the utility patent [6], a modern arrangement of the elements of the angle sensor is used. However, the presence of an elastic connection of the support unit worsens the dynamic characteristics.

The articles [7, 8] consider mathematical models of sensors based on the Hall effect.

The article [9] provides a brief overview of miniature sensors of micro displacement, angular position and force based on the Hall effect.

The article [10] analyzes the state and development prospects of angular displacement measurement devices in 2014. The results of the analysis are relevant at the current time.

In addition, the problem of the domestic electronic component base has been well known since the times of the USSR – a shortage of cheap and accurate position sensors, without which it is impossible to create high-quality electric drives. It is possible that magnetic and some other areas of Russian sensorics will create the basis for a worthy replacement of the shortage of high-quality sensors.

The listed publications confirm the relevance of small-sized and sufficiently accurate magnetic sensors of the Specialized Design Bureau “Induction”, their prospects and manufacturability.

## 1. Schematic Diagram of the Sensor

Fig. 1 shows the appearance of the angle sensor. The sensor includes a permanent magnet and a Hall element. The permanent magnet is installed on the axis of the sensor's rotary leash. The Hall element is built into a specialized microcircuit located on the sensor's printed circuit board inside the housing.

<sup>1</sup> <https://www.sesese.org/Home/Publication?id=97>.

<sup>2</sup> <https://www.sesese.org/Home/Publication?id=97>.

<sup>3</sup> Kondratiev waves represent a time cycle of 40 to 50 years, during which a rapid development of some innovation occurs.



Fig. 1. External appearance of the angle sensor

The diagram of the angle sensor is shown in Fig. 2. The sensor contains a housing 1 equipped with a cylindrical projection 2. In the central part of the housing 1, in a bearing 3, an axis 4 of rotation of the sensor is installed, connected in its upper part with a movable (rotary) part 5. In the lower part of the axis 4, a permanent magnet 6 is fixed, made in the form of a diametrically magnetized disk, fixed coaxially with a sensitive element 7 in the lower part of the cylindrical projection 2 of the housing 1. The magnet 6 is located with a constant air gap equal to 0.5–1 mm, above a sensitive element 7 proportionate to it, installed with the possibility of constant contact on a printed circuit board 8 without the possibility of displacement in the housing 1 of the angle sensor. The printed circuit board 8 is connected by means of fastening elements 9 to the lower part of the cylindrical projection 2 of the housing 1, connected to the fixed part 10. The fixed part 10, having a proportionate opening for the cylindrical projection 2, is fixed to the upper part of the housing 1 by means of fastening elements 11, installed on the lower side of the housing 1. The movable part 5 is connected to the upper part of the axis 4 of rotation through a leash 12 fixed to the axis 4 by means of a fastening element 13. The movable and fixed parts 5 and 10 are located parallel to each other.

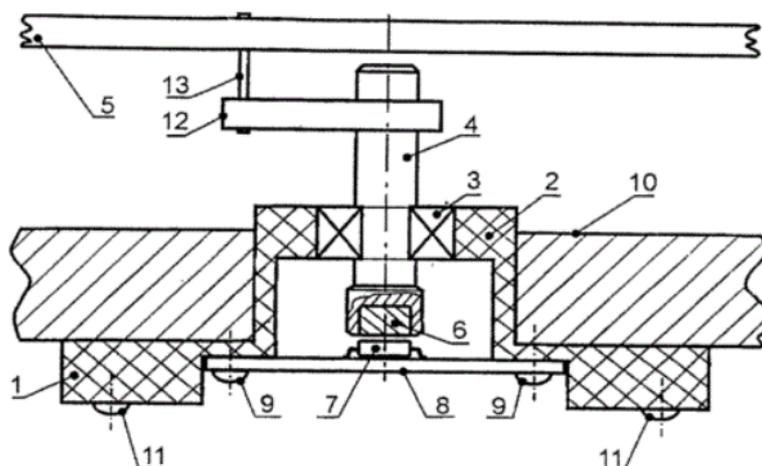


Fig. 2. Schematic diagram of the rotary angle sensor

The device operates as follows. Rotation of the permanent magnet 6 relative to the sensitive element 7 is provided by a rotor unit (not shown in the figure), mechanically connected from the outside of the rotary angle sensor to the movable part 5 with the help of a fastening element 13 by means of a leash 12, fixed on the axis 4. When the axis 4 with the permanent magnet 6 rotates, a change in the position of the magnetic field occurs, acting on the sensitive element 7, which registers the rotary angle of the magnet 6 and converts it together with other electronic components (not shown in the figure) of the printed circuit board 8 into an electrical signal of the required format, proportional to the magnitude of rotation and transmitted further to the registration device via a communication cable.

The complexity of the physical picture of magnetic fields arising during the manufacturing and operation of sensors with permanent magnets necessitates the development of mathematical models that take into account a large number of influencing factors [11, 12].

One of the main elements of the sensor, directly influencing the accuracy of the rotary angle measurement, is the permanent magnet 6. Fig. 3a shows a permanent magnet 1 of cylindrical shape with ideal diametrical magnetization: the magnetization vector 2 is located on the axis of symmetry of the magnet.

Fig. 3b shows a permanent magnet 1 of cylindrical shape with non-ideal diametrical magnetization: the magnetization vector 2 is radially shifted relative to the axis of symmetry of the magnet by the value  $\Delta M$ .

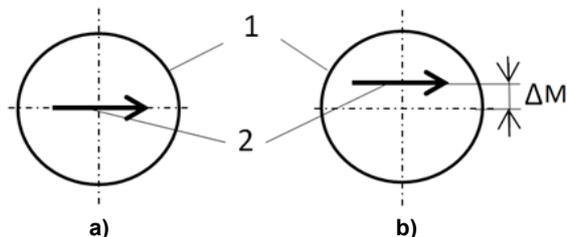


Fig. 3. Magnetization diagrams

Fig. 4a shows the magnet arrangement diagram corresponding to its zero initial position  $\alpha = 0^\circ$ . In this position, the measured angle value  $\alpha^* = -\alpha_0$ . The sign “-” is used to count the angle counter-clockwise. The measured angle value, caused by the radial shift of the magnetization vector, is the sensor zero signal shift. To correct the measured value, it must be added to the zero shift:  $\alpha = \alpha^* + \alpha_0$ . Fig. 4b shows the magnet position for a rotary angle in the range from 0 to  $+90^\circ$ . Fig. 4c shows the magnet position for a rotary angle of  $+90^\circ$ .

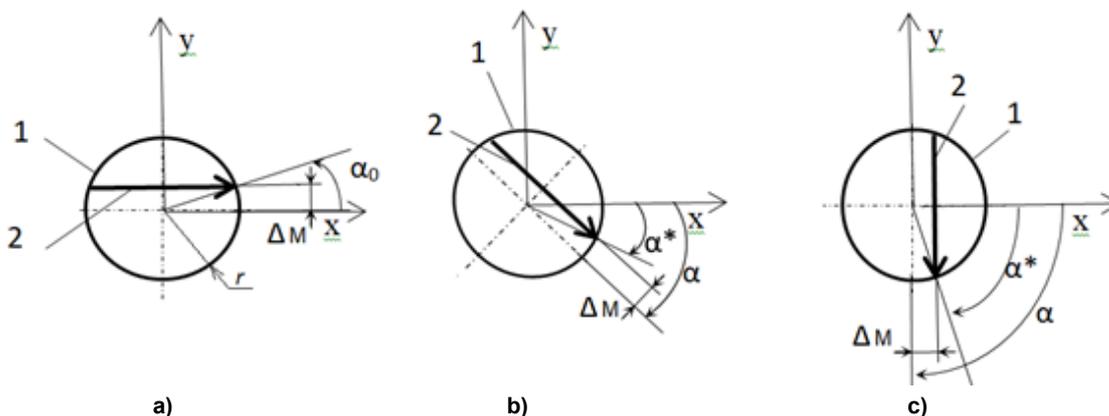


Fig. 4. Schemes for calculating the error

## 2. Mathematical Model of Errors

For an arbitrary rotary angle of a magnet with a radius  $r$ , the relationship between the sensor zero error and the displacement of the magnetization vector has the form:

$$\alpha_0 = r \arcsin(\Delta M/r). \quad (1)$$

The sensitivity of the sensor zero error to the error in the nominal radius of the magnet is obtained by applying the partial derivative with respect to the variable  $r$  to expression (1):

$$\frac{\partial \alpha_0}{\partial r} = - \frac{\Delta M}{r^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{\Delta M^2}{r^2}}} \quad (2)$$

The sensitivity of the sensor zero error to a change in the position of the magnetization vector is obtained by applying the partial derivative with respect to the variable  $\Delta M$  to expression (1):

$$\frac{\partial \alpha_0}{\partial \Delta} = \frac{1}{r \cdot \sqrt{1 - \frac{\Delta M^2}{r^2}}} \quad (3)$$

Using expression (2), we obtain an expression for the absolute dependence of the sensor zero error on the magnet radius error:

$$\Delta \alpha_0(\Delta r) = - \frac{\Delta M}{r^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{\Delta M^2}{r^2}}} \cdot \Delta r. \quad (4)$$

Using expression (3), we obtain an expression for the absolute dependence of the sensor zero error on the change in the position of the magnetization vector:

$$\Delta\alpha_0(\Delta M) = \frac{1}{r \cdot \sqrt{1 - \frac{\Delta M^2}{r^2}}} \cdot \Delta M. \quad (5)$$

Fig. 5 shows the graphs of the sensor zero error from the magnetization vector shift according to expression (1). The graph can be used to numerically estimate the sensor zero error.

Fig. 6 shows the graphs of the sensor zero error according to expression (4) from the change in the magnet radius. The given graph is relevant for the case of algorithmic compensation of the error according to expression (1). During the operation of the sensor, under the influence of external disturbances of various natures, a change in the radial displacement of the magnetization vector is possible, which will lead to the appearance of an error.

Fig. 7 shows the graphs of the sensor zero error depending on the magnet radius and the displacement  $\Delta M$  of the magnetization vector according to expression (5). The given graph of the error is relevant for the case of a change in the ambient temperature. Expression (5) can be used for algorithmic compensation of errors caused by a change in the magnet radius. The same expression will allow justifying the choice of the tolerance field for the nominal size of the magnet diameter at the stage of its design.

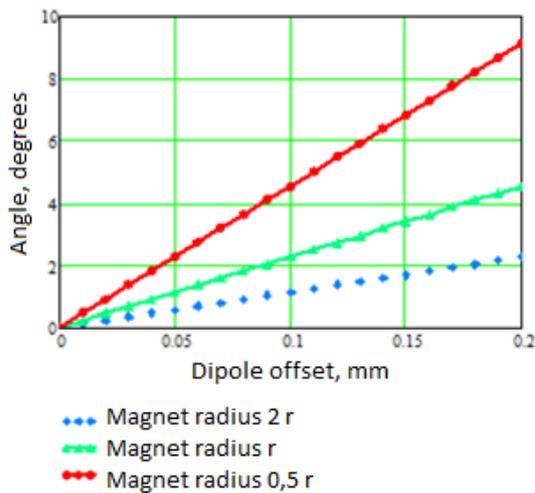


Fig. 5. Sensor error from magnetic dipole offset

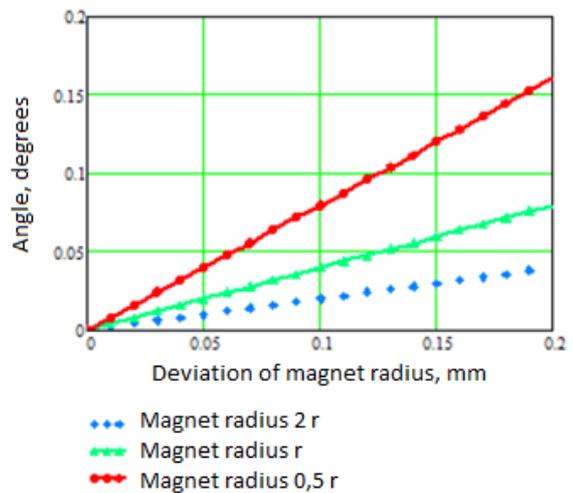


Fig. 6. Sensor error caused by changes in the radial displacement of the magnetization vector

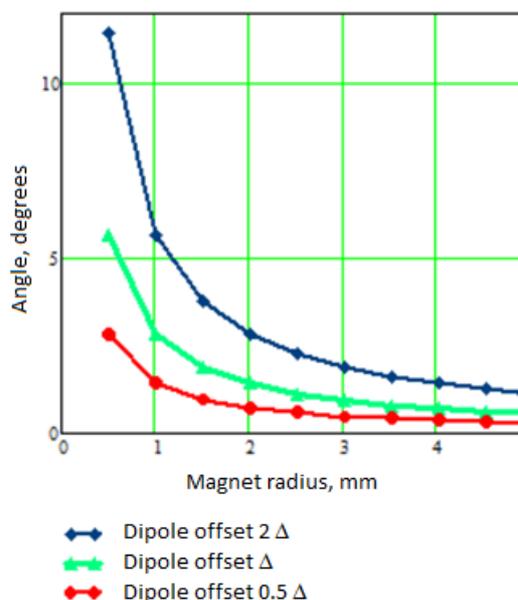


Fig. 7. Sensor error caused by changes in magnet radius  $\Delta$

In [13], the use of an acoustic sensor for assessing the state of production equipment, which can be used to automate the installation of incoming inspection of permanent magnets, is proposed. A prototype of the installation for automatic inspection of permanent magnets is presented in [12, p. 470].

### 3. Schematic Diagram for the Magnetic Dipole Position Monitoring Device

Fig. 8 shows a diagram of a technological device for monitoring the position of the magnetization vector of a permanent magnet. Two permanent magnets with magnetization vectors  $M1$  and  $M2$  are installed coaxially in the device. A channel is made in the transverse direction relative to the longitudinal axis of the device, which serves as a guide for the magnet  $M$  being tested. If the magnetization vector  $M$  of the magnet being tested is not shifted relative to its geometric center, then the diametrical axis is on the same axis as the magnetization vectors  $M1$  and  $M2$ , as shown in Fig. 8.

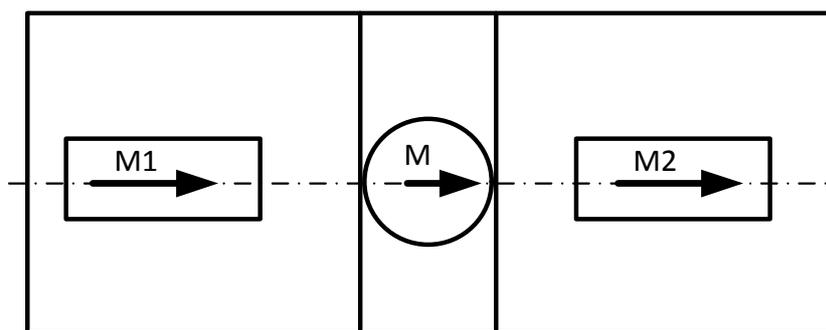


Fig. 8 Position of an ideal magnet in the technological device

Fig. 9 shows the shifted position of the defective magnet relative to the longitudinal axis of the technological device by the value  $\Delta M$  – the shift of the magnetization vector of the permanent magnet  $M$ .

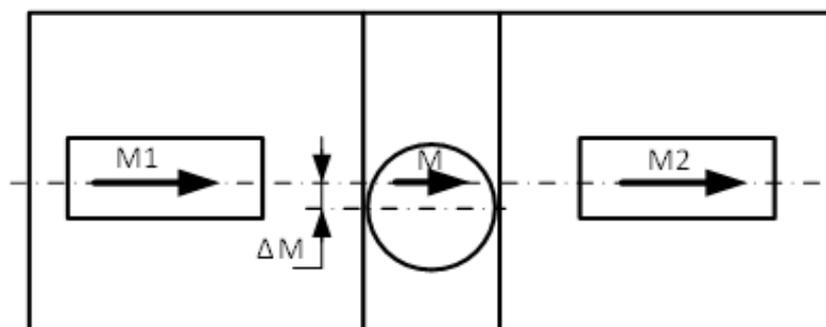


Fig. 9. Position of the defective magnet in the technological device

In [14], a numerical method for processing the results of dynamic measurements, which will reduce the time for assessing the state variables of the controlled object, is considered.

In the conditions of real operation of the angle sensor, its mathematical model in a stochastic formulation is relevant. In this case, it is possible to use the algorithm of adaptive guaranteed estimation of a constant signal under conditions of uncertainty of measurement errors [15].

### Conclusions

The conducted research allowed forming a mathematical model of the error of a non-contact rota angle sensor, built on the Hall effect, containing a permanent magnet in its composition. Based on the mathematical model of the error, a schematic diagram of the technological device has been developed, which allows excluding defective magnets from production at the stage of incoming inspection.

### References

1. Zaytsev I.P. *Datchik ugla povorota* [Angle sensor]. Patent for utility model RU 217597 U1, no. 2023104454; decl. 27.02.2023; publ. 07.04.2023. (In Russ.)
2. Telegin A.I. Analytical solution of the first problem of dynamics of manipulators with rotational joints. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):41–57. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220204
3. Glaz'ev S.Yu., Kharitonov V.V. *Nanotekhnologii kak klyuchevoy faktor novogo tekhnologicheskogo uklada v ekonomike* [Nanotechnology as a key factor in the new technological order in the economy]. Moscow: Trovant; 2009. 304 p. (In Russ.)
4. Glagolev I.P., Zamolodchikov E.V., Kerpel' A.B. et al. *Datchik ugla povorota vala* [Shaft angle sensor]. Patent USSR 773426 A1, no. 2756552; decl. 25.04.1979; publ. 23.10.1980. (In Russ.)
5. Abramtsev E.P. *Datchik uglovykh peremeshcheniy* [Angular displacement sensor]. Patent RU 2110045 C1, no. 96116255/28; decl. 06.08.1996; publ. 27.04.1998. (In Russ.)
6. Nayanov V.V. *Datchik povorota* [Rotation sensor]. Patent for utility model RU 136560 U1, no. 2013135800/28; decl. 30.07.2013; publ. 10.01.2014. (In Russ.)
7. Shcherba A. [Magnetic encoders produced by austriamicrosystems. Positioning the magnet over the microcircuit body]. *Components & Technologies*. 2008;7(84):50–52. (In Russ.)
8. Gauf A., Guseva A. [Magnetic angle sensors (encoders) EcoTurn]. *Components & Technologies*. 2012;1(126):38–41. (In Russ.)
9. Moiseev P.P., Alymov V.B., Nechuskin I.I., Vlasova E.G. Micrometric movement, angular position and force miniature sensors on the Hall effect. *Reshetnev Readings*. 2015;1:289–290. (In Russ.)
10. Volkov A.Yu. About the condition and prospects of the measuring development angular displacement. *Problemy avtomatiki i upravleniâ*. 2014;1(26):160–168. (In Russ.)
11. Sandomirskiy S.G. *Raschet i analiz razmagnichivayushchego faktora ferromagnitnykh tel* [Calculation and analysis of the demagnetization factor of ferromagnetic bodies]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2015. 243 p. (In Russ.)
12. Altman A.B., Vernikovskiy E.E., Gerberg A.N., Gladyshev P.A. *Postoyannye magnity* [Permanent magnets]. Moscow: Energiya; 1980. 488 p. (In Russ.)
13. Nekrasov S.G. Acoustic Sensor for Assessing the State of Production Equipment. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(4):103–114. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210409
14. Yaparov D.D., Shestakov A.L. Numerical Method for Processing the Results of Dynamic Measurements. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(4):115–125. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210410
15. Khadanovich D.V., Shiryaev V.I. Adaptive Guaranteed Estimation of a Constant Signal under Uncertainty of Measurement Errors. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2020;20(4):22–36. DOI: 10.14529/ctcr20040

### Список литературы

1. Пат. на полезную модель 217597 U1 Российская Федерация, МПК G01P 3/02. Датчик угла поворота / И.П. Зайцев; заявитель Общество с ограниченной ответственностью Специализированное конструкторское бюро «Индукция». № 2023104454, заявл. 27.02.2023, опубл. 07.04.2023.
2. Телегин А.И. Аналитическое решение первой задачи динамики манипуляторов с вращательными сочленениями // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 41–57. DOI: 10.14529/ctcr220204
3. Глазьев С.Ю., Харитонов В.В. Нанотехнологии как ключевой фактор нового технологического уклада в экономике. М.: Тривант, 2009. 304 с.
4. А. с. 773426 А1 СССР, МПК G01B 7/30, H03M 1/22. Датчик угла поворота вала / И.П. Глаголев, Е.В. Замолодчиков, А.Б. Керпель [и др.]; заявитель предприятие п/я А-1001. № 2756552; заявл. 25.04.1979; опубл. 23.10.1980.
5. Пат. 2110045 С1 Российская Федерация, МПК G01B 7/30. Датчик угловых перемещений / Е.П. Абрамцев. № 96116255/28; заявл. 06.08.1996; опубл. 27.04.1998.
6. Пат. на полезную модель 136560 U1 Российская Федерация, МПК G01B 7/00. Датчик поворота / В.В. Наянов. № 2013135800/28; заявл. 30.07.2013; опубл. 10.01.2014.

7. Щерба А. Магнитные энкодеры производства austriamicrosystems. Позиционирование магнита над корпусом микросхемы // Компоненты и технологии. 2008. № 7 (84). С. 50–52.
8. Гауф А., Гусева А. Магнитные датчики угла поворота (энкодеры) EcoTurn // Компоненты и технологии. 2012. № 1 (126). С. 38–41.
9. Миниатюрные датчики микроперемещения, углового положения и силы на эффекте Холла / П.П. Моисеев, В.Б. Алымов, И.И. Нечушкин, Е.Г. Власова // Решетневские чтения. 2015. Т. 1. С. 289–290.
10. Волков А.Ю. О состоянии и перспективах развития средств измерения углового перемещения // Проблемы автоматизации и управления. 2014. № 1 (26). С. 160–168.
11. Сандомирский С.Г. Расчет и анализ размагничивающего фактора ферромагнитных тел. Минск: Беларуская навука, 2015. 243 с.
12. Постоянные магниты / А.Б. Альтман, Э.Е. Верниковский, А.Н. Гербергер, П.А. Гладышев; под ред. Ю.М. Пятина. М.: Энергия, 1980. 488 с.
13. Некрасов С.Г. Акустический сенсор для оценки состояния производственного оборудования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 4. С. 103–114. DOI: 10.14529/ctcr210409
14. Япаров Д.Д., Шестаков А.Л. Численный метод обработки результатов динамических измерений // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 4. С. 115–125. DOI: 10.14529/ctcr210410
15. Хаданович Д.В., Ширяев В.И. Адаптивное гарантированное оценивание постоянного сигнала в условиях неопределенности ошибок измерений // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 4. С. 22–36. DOI: 10.14529/ctcr200403

#### *Information about the authors*

**Igor P. Zaitsev**, Chief Designer, Specialized Design Bureau “Induction”, Chelyabinsk, Russia; zaitsev@skbind.ru.

**Dmitriy A. Katcai**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; katcaida@susu.ru.

**Sergey N. Ryzhov**, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Marketing Department, Specialized Design Bureau “Induction”, Chelyabinsk, Russia; market@skbind.ru.

#### *Информация об авторах*

**Зайцев Игорь Петрович**, главный конструктор, Специализированное конструкторское бюро «Индукция», Челябинск, Россия; zaitsev@skbind.ru.

**Кацай Дмитрий Алексеевич**, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; katcaida@susu.ru.

**Рыжов Сергей Николаевич**, канд. техн. наук, начальник отдела маркетинга, Специализированное конструкторское бюро «Индукция», Челябинск, Россия; market@skbind.ru.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

*The article was submitted 31.05.2024*

*Статья поступила в редакцию 31.05.2024*

# Управление в социально-экономических системах Control in social and economic systems

Научная статья  
УДК 62; 004; 007  
DOI: 10.14529/ctcr250207

## ПРОБЛЕМАТИКА ВЕРИФИКАЦИИ ПОДЛИННОСТИ, АВТОРСКОГО ПРАВА И ЦЕЛОСТНОСТИ ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ

**А.А. Шинкарев**, [sania.kill@mail.ru](mailto:sania.kill@mail.ru)

**О.В. Логиновский**, [loginovskiiov@susu.ru](mailto:loginovskiiov@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

**Д.В. Стародубцев**, [starodubtcev.d.v@gmail.com](mailto:starodubtcev.d.v@gmail.com)

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** В настоящее время как никогда все большую актуальность обретает проблема обеспечения безопасности цифровых данных. Потребителями цифровых данных или же информации являются практически все люди в большинстве сфер жизнедеятельности. Безопасными данными в контексте исследования являются данные, происхождение которых достоверно, целостность не нарушена и авторские права соблюдаются. Методы защиты цифровых данных с каждым годом совершенствуются, стремясь предотвращать кражу информации и оберегать людей от недостоверных или заведомо ложных сведений. Однако при всем своем многообразии и технологической зрелости современные подходы к верификации подлинности, авторского права, целостности мультимедиа и инструменты на их основе не всегда могут защитить потребителей информации в полном объеме от современных киберугроз. При создании нового также не всегда устраняются концептуальные проблемы того, что было раньше. Новые подходы, инструменты и стандарты зачастую привносят новые уязвимости, которые используются злоумышленниками для атаки. **Цель исследования:** провести анализ современных методов и технологий верификации подлинности, авторского права и целостности мультимедийных данных, а также предложить комплексный подход, который может способствовать решению выявленных проблем. **Материалы и методы.** Используется ретроспективный метод для анализа исторического развития технологий защиты данных, криптографические подходы, а также современные решения на основе блокчейна и машинного обучения. **Результаты.** Анализ показал, что традиционные криптографические методы, несмотря на эффективность в обеспечении целостности данных, сталкиваются с ограничениями в распределенных системах из-за отсутствия единых стандартов и сложности масштабирования. **Заключение.** Несмотря на разнообразие существующих технологий подтверждения авторства, целостности, и аутентичности цифровых данных в общем и мультимедиа в частности, на сегодняшний день проблемы отсутствия стандартизации и фрагментированности решений остаются одними из ключевых вызовов в области обеспечения комплексной безопасности цифровых данных.

**Ключевые слова:** безопасность данных, верификация подлинности, цифровая подпись, блокчейн, NFT, машинное обучение, криптография, электронный документооборот

**Для цитирования:** Шинкарев А.А., Логиновский О.В., Стародубцев Д.В. Проблематика верификации подлинности, авторского права и целостности цифровых данных // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 74–81. DOI: 10.14529/ctcr250207

Original article  
DOI: 10.14529/ctcr250207

## PROBLEMATICS OF AUTHENTICITY VERIFICATION, COPYRIGHT AND DIGITAL DATA INTEGRITY

A.A. Shinkarev, [sania.kill@mail.ru](mailto:sania.kill@mail.ru)

O.V. Loginovskiy, [loginovskiyo@mail.ru](mailto:loginovskiyo@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

D.V. Starodubtcev, [starodubtcev.d.v@gmail.com](mailto:starodubtcev.d.v@gmail.com)

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** Nowadays, the problem of ensuring the security of digital data is becoming more urgent than ever. Consumers of digital data or information are almost all people in most spheres of life. Secure data in the context of research is data whose origin is reliable, its integrity is intact, and copyrights are respected. Digital data protection methods are being improved every year in an effort to prevent information theft and protect people from false or deliberately false information. However, with all its diversity and technological maturity, modern approaches to verifying the authenticity, copyright and integrity of multimedia and tools based on them cannot always fully protect consumers of information from modern cyber threats. Introduction of something new does not always eliminate the conceptual problems of what was before. New approaches, tools, and standards often introduce new vulnerabilities that are used by attackers. **Research goal.** To analyze modern methods and technologies for verifying authenticity, copyright and integrity of multimedia data, as well as to propose an integrated approach that can help to solve the identified problems. **Materials and methods.** Retrospective method is used to analyze the historical development of data protection technologies, cryptographic approaches, as well as modern solutions based on blockchain and machine learning. **Results.** The analysis showed that traditional cryptographic methods, despite their effectiveness in ensuring data integrity, face limitations in distributed systems due to the lack of uniform standards and the complexity of scaling. **Conclusion.** Despite the variety of existing technologies for verifying the authorship, integrity, and authenticity of digital data in general and multimedia in particular, today the problems of lack of standardization and fragmentation of solutions remain among key challenges in the area of making digital data secure in its entirety.

**Keywords:** data security, authentication, digital signature, blockchain, NFT, machine learning, cryptography, electronic document management

**For citation:** Shinkarev A.A., Loginovskiy O.V., Starodubtcev D.V. Problematics of authenticity verification, copyright and digital data integrity. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(2):74–81. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250207

### Введение

В настоящее время проблема безопасности цифровых данных становится более явной из-за увеличения числа кибератак, утечек информации и роста объемов цифровых данных, которые ежедневно обрабатываются и передаются через Интернет. Ситуация также обостряется по причине экономической и внешнеполитической нестабильности в мире. В соответствии с отчетом Лаборатории Касперского [1] в первом полугодии 2024 года количество атак выросло на 39 % по сравнению с аналогичным периодом 2023 года. Повышенная активность киберпреступников также сопровождается ростом количества утечек персональных данных пользователей веб-сервисов. По данным экспертно-аналитического центра ГК InfoWatch [2], в первом полугодии 2024 года в России количество случаев кражи личной информации выросло на 10,1 %, скомпрометировано 986 миллионов записей. Приведенная статистика свидетельствует об обострении ситуации в области обеспечения безопасности в киберпространстве. Эта сфера со всеми ее вызовами все больше привлекает внимание как общества, так и государства.

Актуальность обеспечения безопасности при работе с цифровыми данными подтверждает стратегия технологического развития Российской Федерации до 2030 года [3], важным аспектом которой является необходимость обеспечения безопасности информационной инфраструктуры предприятий. С ускорением цифровизации и цифровой трансформации ключевых сфер общественной и экономической деятельности все важнее становится разработка новых и освоение суще-

ствующих алгоритмов и методов для защиты данных в системах связи и электронного документооборота, что имеет особую важность для государственных и муниципальных организаций, коммерческих структур и разработчиков программного обеспечения, ответственных за безопасность информационных систем. Разрабатываемые методы защиты, согласно триаде безопасности [4], должны обеспечить конфиденциальность, целостность и защиту чувствительной информации. Рассмотрим развитие подходов и механизмов обеспечения подлинности цифровых данных в исторической ретроспективе, чтобы выявить проблемы, которые они были призваны решить, и ответить на вопрос о том, насколько это удалось сделать.

### **1. Развитие методов проверки подлинности данных в исторической ретроспективе**

Защита и верификация подлинности данных берет начало в глубокой древности, когда письменность только начинала зарождаться. Одними из первых методов защиты информации были физические метки и уникальные знаки. Например, в Месопотамии информацию фиксировали на глиняных табличках, на которых наносились отметки с помощью специальных печатей цилиндрической формы с индивидуальными надписями. В свою очередь, в Древнем Риме также использовались особые знаки для установления авторства документа, это могли быть инициалы или личные знаки. К тому же применялся метод запечатывания с использованием колец-печатей [5].

С развитием государств и торговли потребность в верификации подлинности документов выросла, дополнительно к печатям (уже гербовым) стали использовать водяные знаки на бумаге. Они могли служить клеймом, символизирующим конкретное производство, или же устанавливать его географическое положение.

Методы верификации подлинности документов постоянно совершенствовались. Вводились новые стандарты в делопроизводстве, что позволяло поддерживать высокий уровень безопасности документов. Одним из таких методов стала подпись документов с помощью пера и чернил. Уникальность почерка подписанта стала играть важную роль при проверке подлинности документов. Это позволило значительно сократить количество фальсификаций ввиду сложности подделки индивидуальных особенностей почерка [6].

В эпоху развития информационных технологий методы защиты данных кардинально изменились. В Первую и Вторую мировые войны использовались механические шифраторы, такие как машина «Энигма». Шифрование сообщений применялось и в древнее время, но с появлением подобных машин получилось автоматизировать данный процесс, что способствовало значительному росту уровня качества и скорости шифрования и помогло обеспечить лучшую защиту военных сообщений [7].

Позже, с момента распространения компьютеров, начали разрабатываться алгоритмы верификации подлинности данных, такие как хеширование и цифровые подписи. Принцип цифровой подписи построен на асимметричном шифровании с открытым ключом. Однако шифрование данных больших размеров, например, видео или фото, является ресурсозатратным процессом, именно поэтому внедрили использование алгоритмов хеширования. Подобные алгоритмы позволили сократить исходное количество данных в несколько раз и при этом оставили возможность удостовериться в их целостности. Этот подход задал высочайший уровень защиты данных [8].

Похожий принцип используется для установки защищенного соединения при применении протокола передачи данных HTTP, который называется HTTPS. В основе данной системы применяются алгоритмы симметричного и асимметричного шифрования, что позволяет обеспечить конфиденциальность и целостность передаваемой информации [9].

Еще одной важной вехой в развитии безопасности данных является применение биометрического распознавания для установки личности человека. Распознавание лиц, отпечатков пальцев и других биометрических данных активно используется для аутентификации пользователей, чтобы предотвратить нелегитимный доступ к информации [10].

В современном мире для защиты данных задействуются децентрализованные технологии, такие как блокчейн, которые обеспечивают неизменность данных, позволяя проверять их подлинность без центрального органа. Данная технология активно развивается и применяется во многих сферах общества, где так или иначе необходимо устанавливать подлинность информации, например, в области финансовых операций и кибербезопасности [11].

От первых печатей и подписей до сложных алгоритмов и биометрических данных человечество прошло долгий путь в развитии методов проверки подлинности и защиты данных. Современные технологии не только обеспечивают высокую степень безопасности, но и открывают новые горизонты для автоматизации и улучшения систем защиты данных. Однако методы фальсификации цифровых данных развиваются с такой же скоростью и требуют все более пристального внимания со стороны разработчиков подходов и инструментов для защиты данных.

## 2. Проблематика обеспечения безопасности цифровых данных в современных условиях

Особую значимость проблема безопасности цифровых данных приобретает в контексте цифровой экономики, которая опирается на доверие к цифровым платформам и данным, которыми они оперируют. Способность эффективно проверять подлинность и целостность информации становится критически важной для устойчивого функционирования цифровой среды. Одним из ключевых аспектов информационной безопасности является обеспечение подлинности цифровых данных, включая данные, циркулирующие в системах электронного документооборота. Это не только способствует предотвращению несанкционированного доступа и подмены данных, но и укрепляет доверие к цифровым инструментам, формирующим основу современной экономики и социальных взаимодействий.

Помимо всего прочего, существует тенденция роста объемов цифровых данных [12], что является следствием появления широкого спектра инструментов для создания и редактирования различного рода цифровых данных, таких как фото, видео и аудио. Современные технологии позволяют пользователям с минимальными техническими знаниями создавать текстовые, визуальные и аудиоданные, что, с одной стороны, делает это доступным для людей без соответствующих навыков, но, с другой стороны, развитие технологий порождает новые вызовы в области защиты интеллектуальной собственности.

Одной из ключевых проблем в этом контексте становится верификация авторства, установка подлинности и целостности цифровых данных. Технологическая доступность инструментов для обработки и манипуляции с данными упрощает несанкционированное копирование, переработку и даже коммерческое использование данных без ведома и разрешения правообладателя. Такие действия нарушают авторские права и подрывают доверие к цифровым платформам как к среде безопасного распространения творческих и профессиональных работ.

В условиях необходимости обеспечения защиты авторских прав требуется внедрение и совершенствование алгоритмов и методов верификации подлинности цифровых данных. Это может включать в себя разработку и внедрение технологий цифровых водяных знаков, систем цифровой подписи, блокчейн-технологий для отслеживания происхождения и изменения данных, а также применение методов машинного обучения для автоматического выявления случаев нарушения авторских прав. Совершенствование таких методов становится ключевым для создания доверительной цифровой среды, в которой интеллектуальная собственность защищена на всех этапах ее существования и распространения.

Развитие нейронных сетей, особенно таких как генеративно-сопоставительные сети (GAN) [13] и трансформеры (transformers) [14], привело к значительному прогрессу в области синтеза мультимедийных данных. Эти алгоритмы способны с высокой степенью реалистичности создавать изображения, видео и аудио.

Одной из существенных проблем, вытекающих из этого технологического достижения, является возможность создания поддельных документов и материалов, включая так называемые дипфейки (deepfakes) [15]. Эти фальсифицированные материалы характеризуются высокой степенью правдоподобности, относительно невысокой стоимостью создания и доступностью широким кругам непрофессионалов. Дипфейки высокого качества, поданные аудитории в правильный момент и получившие поддержку с помощью методов социальной инженерии, могут быть практически неотличимы от достоверных оригинальных данных без применения профессионалами специальных методов анализа.

В результате возникает ряд угроз, связанных как с индивидуальной, так и с общественной безопасностью, таких как нарушение конфиденциальности, дискредитация лиц через поддельные высказывания, фальсификация официальных документов и утрата доверия к визуальным и аудиодоказательствам.

Особенно критична данная проблема в контексте систем электронного документооборота, где подлинность и целостность документов являются основой для принятия юридически значимых решений. Утечки персональных данных пользователей только усугубляют существующую ситуацию, давая злоумышленникам больше исходных данных для фальсификации критически важных документов. Объем и детализация украденной информации существенно увеличивают вероятность создания поддельных материалов, обладающих высокой степенью достоверности. Это, в свою очередь, ставит под угрозу безопасность как индивидуальных пользователей, так и организаций, поскольку нарушается целостность и доверие к документам, используемым в деловой и юридической практике. Использование электронных цифровых подписей (ЭЦП) позволяет значительно повысить уровень защиты документов. ЭЦП работает на основе криптографических алгоритмов, которые обеспечивают уникальность и неизменность подписи. Когда документ подписывается электронной подписью, создается своего рода цифровой отпечаток, который привязан к содержимому документа. Если злоумышленник попытается изменить документ, подпись станет недействительной, что сразу выявит факт фальсификации. Таким образом, ЭЦП не только подтверждает авторство, но и гарантирует, что документ не был изменен после подписания. Это делает кражу и подделку документа крайне сложной, так как для успешной фальсификации потребуется не только доступ к самой подписи, но и взлом криптографической защиты. Однако, несмотря на высокий уровень безопасности, ЭЦП не является абсолютно неуязвимой. Во-первых, безопасность электронной подписи напрямую зависит от надежности закрытого ключа, который используется для ее создания. Если злоумышленник получит доступ к закрытому ключу (например, через фишинг, вредоносное ПО или кражу устройства, на котором он хранится), он сможет подписывать документы от имени владельца подписи. Во-вторых, устаревшие или слабые криптографические алгоритмы могут быть взломаны с использованием современных вычислительных мощностей, что делает подпись уязвимой. В-третьих, человеческий фактор также играет важную роль: небрежное хранение ключей или использование простых паролей для их защиты может свести на нет все преимущества ЭЦП.

### **3. Современные методы верификации подлинности, авторского права и целостности цифровых данных**

Современные технологии, такие как блокчейн и NFT (невзаимозаменяемые токены), предлагают инновационные подходы к решению задач верификации подлинности, авторского права и целостности мультимедиа. Блокчейн благодаря своей децентрализованной природе и свойствам неизменяемости данных может служить надежным инструментом для фиксации и проверки авторства цифрового контента. Например, платформа Ethereum активно используется для создания NFT, которые позволяют художникам и создателям контента закреплять права на свои работы. Однако, несмотря на преимущества блокчейна, существуют ограничения, связанные с тем, что NFT, используемые для подтверждения прав на цифровые активы, не хранят сами мультимедийные данные, а лишь содержат ссылки на них. В случае утраты или модификации исходных данных NFT теряют свою функциональность в контексте подтверждения подлинности. Это подчеркивает необходимость разработки дополнительных механизмов, обеспечивающих сохранность и неизменность исходных данных, а не временной ссылки на их текущее местоположение. Например, проект Arweave предлагает решение для долговременного хранения данных в децентрализованной сети, что может быть использовано в сочетании с NFT для обеспечения сохранности мультимедиа [16].

В системах электронного документооборота (ЭДО), таких как Контур.Диадок или КристоПро, криптографические методы играют ключевую роль в обеспечении безопасности данных. Электронная подпись (ЭП) используется для подтверждения авторства и целостности документов, что делает криптографию основой для защиты информации от несанкционированного доступа и подделки. Криптографические алгоритмы, такие как хэш-функции и асимметричное шифрование, обеспечивают не только конфиденциальность данных, но и их неизменность, что является критически важным для верификации подлинности мультимедиа. Например, стандарт SHA-256 широко используется для создания уникальных хэш-сумм, которые позволяют проверять целостность данных. Даже минимальное изменение в документе (например, добавление одного символа или пробела) приведет к тому, что хэш-сумма станет совершенно другой. Например, если в тексте

«Договор № 123» изменить «123» на «124», хэш-сумма изменится кардинально, что сразу выявит факт подделки. Вероятность того, что возникнет коллизия (два разных документа будут иметь одинаковую хэш-сумму), крайне мала [17].

С развитием технологий создания дипфейков проблема идентификации поддельного контента становится все более актуальной. Современные методы машинного обучения, в частности нейронные сети, активно применяются для выявления поддельных видео- и аудиозаписей. Эти методы основаны на анализе специфических признаков, таких как аномалии в движении глаз, текстуре кожи или артефактах в аудиосигналах. Например, исследователи из Калифорнийского университета в Беркли разработали алгоритм, который анализирует микроэкспрессии лица для обнаружения дипфейков [18]. Данный подход выделяется корректностью определения поддельных данных, однако все же не всегда корректно может определить использование генеративных нейронных сетей.

Одной из ключевых проблем в области верификации цифрового контента остается отсутствие стандартизации. Без единого подхода к верификации подлинности цифровых данных решения остаются фрагментированными и несовместимыми между собой. В этом контексте важную роль играют совместные инициативы, такие как C2PA (Coalition for Content Provenance and Authenticity), которые направлены на создание универсальных стандартов для верификации цифровых данных. C2PA позволяет встраивать метаданные, фиксирующие происхождение и историю изменений исходных данных, что открывает путь к созданию унифицированной системы верификации, минимизирующей необходимость человеческого вмешательства. Например, компания Adobe уже интегрировала поддержку C2PA в свои продукты, что позволяет пользователям проверять подлинность изображений [19]. Однако C2PA основывается на честности создателя цифровых данных, так как именно он предоставляет метаданные о происхождении и истории изменений. Если создатель изначально предоставляет ложную информацию или использует генеративные нейронные сети для создания контента, система C2PA не сможет самостоятельно выявить это, так как она не проводит глубокий анализ на предмет использования таких технологий. В отличие от блокчейна и NFT, где проблема заключается в хранении данных (ссылки на данные, которые могут быть утеряны или изменены), C2PA интегрирует подпись и метаданные непосредственно в сам контент. Это делает подпись неотъемлемой частью данных, что повышает их защищенность и упрощает проверку подлинности. Тем не менее такой подход все еще требует доверия к создателю контента, что остается слабым звеном в системе.

### **Заключение**

Несмотря на разнообразие существующих технологий, единого универсального решения для обеспечения подлинности, авторского права и целостности мультимедиа на данный момент не существует. Каждая из технологий предлагает свои уникальные методы, в основе большинства из них лежат криптографические принципы. Криптография обеспечивает защиту данных за счет таких механизмов, как шифрование, цифровые подписи и хэш-функции, которые гарантируют конфиденциальность и целостность данных. Эти принципы являются фундаментальными для создания надежных систем верификации, но не дают полной гарантии корректной верификации подлинности данных.

Таким образом, для решения проблем верификации подлинности, авторского права и целостности мультимедиа необходим комплексный подход, объединяющий лучшие аспекты существующих технологий. Такой подход должен обеспечивать не только целостность и конфиденциальность данных, но и учитывать возможность их модификации с использованием современных технологий, таких как нейронные сети. Кроме того, важно создание единой структуры, которая позволит интегрировать данные из различных источников и обеспечивать их верификацию на основе универсальных стандартов. Это требует дальнейших исследований и разработок, а также активного взаимодействия между научным сообществом, индустрией и регуляторными органами.

### Список литературы

1. Kaspersky Security Bulletin 2024: Statistics [Электронный ресурс]. URL: <https://securelist.ru/ksb-2024-statistics/111289/> (дата обращения: 15.12.2024).
2. ГК InfoWatch: Утечки информации в мире и России за первое полугодие 2024 года [Электронный ресурс]. URL: <https://www.infowatch.ru/analytics/utechki-informatsii-v-mire-i-rossii-za-pervoye-polugodiye-dve-tysyachi-dvadtsat-chetvertogo-goda.pdf> (дата обращения: 15.12.2024).
3. Концепция технологического развития на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р.
4. Stallings W. *Network Security Essentials: Applications and Standards*. Prentice Hall, Pearson Education, 2011. 432 p.
5. Collon D. *First Impressions: Cylinder Seals in the Ancient Near East*. London, British Museum Publications, 1988. 208 p.
6. Щепкин В.Н. Русская палеография. М.: Наука, 1967. 225 с.
7. Smith J. Emerging Technologies in Cybersecurity // *Journal of Cybersecurity Trends*. 2017. 6 p.
8. Черемушкин А.В. О содержании понятия «электронная подпись» // *Прикладная дискретная математика*. 2012. № 3 (17). С. 53–69.
9. Rescorla E. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3. Internet Engineering Task Force (IETF), 2018. 160 p.
10. Jain A.K., Ross A., Nandakumar K. *Introduction to Biometrics*. Springer, 2016. 328 p.
11. Nakamoto S. *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. 2008. 9 p.
12. Олифер В.Г., Олифер Н.А. *Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы*. СПб.: Питер, 2016. 996 с.
13. Generative adversarial networks / I. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza et al. // *Advances in neural information processing systems*. 2014. 9 p.
14. Attention Is All You Need / A. Vaswani et al. // *31st Conference on Neural Information Processing Systems*. 2017. 15 p.
15. Chesney R., Citron D. Deepfakes and the New Disinformation War // *Foreign Affairs*. 2019. P. 147–155.
16. Arweave [Электронный ресурс]. URL: <https://arweave.org/> (дата обращения: 20.12.2024).
17. Secure Hash Standard (SHS). National Institute of Standards and Technology (NIST). FIPS PUB 180–4, 2015. 36 p.
18. Negi S., Jayachandran M., Upadhyay S. Deep fake: An Understanding of Fake Images and Videos // *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2021. Vol. 7 (3). P. 183–189. DOI: 10.32628/CSEIT217334
19. Content Authenticity Initiative [Электронный ресурс]. URL: <https://contentauthenticity.org/> (дата обращения: 25.12.2024).

### References

1. Kaspersky Security Bulletin 2024: Statistics. Available at: <https://securelist.ru/ksb-2024-statistics/111289/> (accessed 15 December 2024).
2. *GK InfoWatch: Utechki informatsii v mire i Rossii za pervoe polugodie 2024 goda* [InfoWatch: Information leaks in the world and Russia in the first half of 2024]. (In Russ.) Available at: <https://www.infowatch.ru/analytics/utechki-informatsii-v-mire-i-rossii-za-pervoye-polugodiye-dve-tysyachi-dvadtsat-chetvertogo-goda.pdf> (accessed 15 December 2024).
3. *Kontseptsiya tekhnologicheskogo razvitiya na period do 2030 goda. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 20 maya 2023 g. No. 1315-r.* [The concept of technological development for the period up to 2030. Approved by the order of the Government of the Russian Federation of May 20, 2023 No. 1315-r.]. (In Russ.)
4. Stallings W. *Network Security Essentials: Applications and Standards*. Prentice Hall, Pearson Education; 2011. 432 p.
5. Collon D. *First Impressions: Cylinder Seals in the Ancient Near East*. London, British Museum Publications; 1988. 208 p.
6. Shechepkin V.N. *Russkaya paleografiya* [Russian paleography]. Moscow: Nauka; 1967. 225 p. (In Russ.)
7. Smith J. Emerging Technologies in Cybersecurity. *Journal of Cybersecurity Trends*. 2017. 6 p.

8. Cheremushkin A.V. On the notion of electronic signature. *Applied discrete mathematics*. 2012;3(17):53–69. (In Russ.)
9. Rescorla E. *The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3*. Internet Engineering Task Force (IETF), 2018. 160 p.
10. Jain A.K., Ross A., Nandakumar K. *Introduction to Biometrics*. Springer; 2016. 328 p.
11. Nakamoto S. *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. 2008. 9 p.
12. Oлифер V.G., Oлифер N.A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. St. Petersburg: Piter; 2016. 996 p. (In Russ.)
13. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M. et al. Generative adversarial networks. In: *Advances in neural information processing systems*. 2014. 9 p.
14. Vaswani A. et al. Attention Is All You Need. In: *31st Conference on Neural Information Processing Systems*. 2017. 15 p.
15. Chesney R., Citron D. Deepfakes and the New Disinformation War. In: *Foreign Affairs*. 2019. P. 147–155.
16. Arweave. Available at: <https://arweave.org/> (accessed 20 December 2024).
17. *Secure Hash Standard (SHS)*. National Institute of Standards and Technology (NIST). FIPS PUB 180–4; 2015. 36 p.
18. Negi S., Jayachandran M., Upadhyay S. Deep fake: An Understanding of Fake Images and Videos. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2021;7(3):183–189. DOI: 10.32628/CSEIT217334
19. Content Authenticity Initiative. Available at: <https://contentauthenticity.org/> (accessed 25 December 2024).

#### **Информация об авторах**

**Шинкарев Александр Андреевич**, канд. техн. наук, доц. кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; [sania.kill@mail.ru](mailto:sania.kill@mail.ru).

**Логиновский Олег Витальевич**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; [loginovskiiiov@susu.ru](mailto:loginovskiiiov@susu.ru).

**Стародубцев Дмитрий Владимирович**, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; [starodubtcev.d.v@gmail.com](mailto:starodubtcev.d.v@gmail.com).

#### **Information about the authors**

**Aleksandr A. Shinkarev**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; [sania.kill@mail.ru](mailto:sania.kill@mail.ru).

**Oleg V. Loginovskiy**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; [loginovskiiiov@susu.ru](mailto:loginovskiiiov@susu.ru).

**Dmitriy V. Starodubtcev**, Postgraduate student of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; [starodubtcev.d.v@gmail.com](mailto:starodubtcev.d.v@gmail.com).

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

**Статья поступила в редакцию 27.12.2024**

**The article was submitted 27.12.2024**

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ОРГАНИЗАЦИЕЙ ОБЩЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ЧЕРЕЗ МАТЕРИАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

**А.Д. Богданов**<sup>1</sup>, [andrey.bogdanov@phystech.edu](mailto:andrey.bogdanov@phystech.edu), <https://orcid.org/0000-0003-3237-3082>  
**А.В. Щепкин**<sup>2</sup>, [av\\_shch@mail.ru](mailto:av_shch@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4229-6976>

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия

**Аннотация.** Данное исследование посвящено методическому подходу, который рассматривает школу как цельный объект, одновременно взаимодействующий со многими агентами, а также актуальному вопросу влияния материальной базы на управление образовательным процессом в российских школах. В статье предлагается несколько моделей взаимодействия между школами и поставщиками, апробированных с помощью интервью директоров школ и компаний-поставщиков. **Цель исследования:** рассмотреть школу как цельный объект и определить влияние материальной базы на образовательный процесс в российских школах. **Материалы и методы.** Для определения используемых фундаментальных механизмов управления была применена декомпозиция целей, которая показала значительное влияние механизма «затраты – эффект» на несколько ключевых показателей, связанных с целями оснащения школ. Кроме того, в работе проведен количественный анализ механизма, подразумевающий ранжирование направлений расходов в рамках механизма «затраты – эффект». Чтобы выделить основные категории оборудования, был проведен расчет корреляции между количеством студентов, набравших на экзаменах от 251 до 300 баллов по государственному экзамену, и стоимостью этого типа оборудования. **Результаты.** Анализ показал, что лабораторное и цифровое оборудование имеет наиболее значимые корреляции бюджета на закупку и образовательного результата школ. Закупки учебной литературы оказывают менее значительный эффект. Закупки оборудования для школ описываются тремя ключевыми механизмами: оптимизацией цепочек поставок, стимулированием и механизмом «затраты – эффект». **Заключение.** В данной статье рассматриваются вопросы определения показателей эффективности закупок школ, полученных на основе декомпозиции целей директоров средних школ, и описание механизмов управления закупками различных видов оборудования, влияющих на жизненно важные результаты. Получены данные о потенциальном влиянии закупок различных типов школьного оборудования на образовательный результат и описан механизм «затраты – эффект» применительно к школе.

**Ключевые слова:** теория управления, школьное образование, материальное обеспечение, механизм «затраты – эффект»

**Для цитирования:** Богданов А.Д., Щепкин А.В. Методический подход к управлению организацией общего образования через материальное обеспечение // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 82–94. DOI: 10.14529/ctcr250208

Original article

DOI: 10.14529/ctcr250208

## A METHODOLOGICAL APPROACH TO THE MANAGEMENT OF GENERAL EDUCATION INSTITUTIONS THROUGH MATERIAL RESOURCE PROVISION

A.D. Bogdanov<sup>1</sup>, [andrey.bogdanov@phystech.edu](mailto:andrey.bogdanov@phystech.edu), <https://orcid.org/0000-0003-3237-3082>A.V. Tschepkin<sup>2</sup>, [av\\_shch@mail.ru](mailto:av_shch@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4229-6976><sup>1</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia<sup>2</sup> V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** This study focuses on a methodological approach that views the school as a holistic entity interacting simultaneously with multiple agents, as well as on the pressing issue of how material resources influence the management of the educational process in Russian schools. The article presents several models of interaction between schools and suppliers, tested through interviews with school principals and supplier company representatives. **Aim.** The aim is to consider the school as an integral object and to determine the impact of the material base on the educational process in Russian schools. **Materials and methods.** The approach based on the formation of the goal tree is widely used to solve them. To identify the fundamental management mechanisms used, we applied the decomposition of goals, which showed the most significant impact of the cost-effect mechanism on several keys related to equipment goals of schools. Furthermore, we carried out a quantitative analysis of the results in this study, implying a rating of spending directions within the cost-effect mechanism framework. To highlight the essential equipment categories, we calculated the correlations between the number of students with exam scores above 251/300 points of a state exam and the cost of this type of equipment. **Results.** As it turned out, laboratory and digital equipment have the most significant correlations. Purchases of educational literature have a more negligible effect. School procurement of equipment is described by three key control mechanisms: supply chain optimization, incentive, and cost-effect mechanisms. **Conclusion.** This article discusses the issues of determining the effectiveness of school procurement indicators based on the decomposition of the goals of secondary school principals, and describes the procurement management mechanisms for various types of equipment that affect vital results. Data on the potential impact of purchases of various types of school equipment on educational outcomes has been obtained and the cost-effect mechanism applied to schools has been described.

**Keywords:** control systems, secondary education, material base, cost-effect mechanism

**For citation:** Bogdanov A.D., Tschepkin A.V. A methodological approach to the management of general education institutions through material resource provision. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(2):82–94. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250208

### Введение

Рынок материально-технического обеспечения школ является ключевым, формирующим образовательную среду и поддерживающим образовательно-воспитательный процесс учащихся [1, 2]. Помимо решения практической задачи образования молодежи рынок материально-технического обеспечения школ в Российской Федерации является крупным рынком с объемом более 50 миллиардов российских рублей в год [3] и объектом интереса как для частного сектора, так и для правительства. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации, ответственное за развитие отрасли, проявляет особый интерес к определению механизмов управления оборудованием в образовательных школах. Также опыт европейских и китайских школ демонстрирует влияние оборудования на образовательный процесс [4, 5]. Однако различные исследования влияния материальной базы школы на образовательный процесс и достижения учащихся редко используют количественные методы анализа.

Первая часть работы описывает эмпирическое исследование, в котором проверяются гипотезы о различных моделях взаимодействия и о функциях полезности участников отрасли образовательного оборудования. Во второй части исследования рассматривается декомпозиция целей школ в рамках закупок оборудования, определение фундаментальных механизмов управления и консолидация функций полезности. Третья часть раскрывает использование механизма «затраты – эффект»

и показывает, какое оборудование в наибольшей степени влияет на функцию полезности школ (образовательный результат). После этого раскрываются перспективы будущих исследований.

Научная новизна работы заключается в применении механизмов математического моделирования для описания образовательной отрасли. Эта работа имеет широкую практическую применимость. Во-первых, результаты, полученные в ходе исследования, могут служить рекомендательной базой для приобретения определенного оборудования школами с целью повышения их результатов. Во-вторых, механизмы управления, выявленные в ходе исследования, а также направления закупок, влияющие на образовательный результат, должны стать основой системы управления отраслью оборудования для школ, создаваемой Министерством промышленности и торговли России.

В данной статье также представлены уникальные количественные результаты, которые в основном подтверждают качественные результаты статей об образовании в России и мире. Например, документ «Систематический обзор исследований в области STEM-образования в странах Персидского залива: тенденции, пробелы и барьеры» [6] качественно подтверждает результат о высоком влиянии цифрового и научного оборудования на результаты образования. Опыт Финляндии [4] аналогичен: учащиеся, использующие современные цифровые технологии и обладающие высокими функциональными цифровыми навыками, лучше сдают школьные тесты. Модели управления сектором образования и основные трудности, отраженные в работе коллег из Высшей школы экономики [7], совпадают с моделями взаимодействия, показанными в данной работе. Работа американских коллег «Высокий доступ и низкий уровень развития технологий в классах средней школы: объяснение очевидного парадокса» [1] также качественно, на основе интервью с учителями, показала важность использования школьного оборудования.

### 1. Описание методического подхода

Методический подход работы рассматривает школу как целостный объект, одновременно взаимодействующий с множеством агентов на разных уровнях мультиорганизационной системы (рис. 1). Мультиорганизационная система включает в себя:

- уровень управления (муниципальные департаменты, региональные и федеральные органы власти);
- уровень исполнения (администрация школы, педагогический коллектив);
- уровень поставщиков (компании, обеспечивающие материально-техническое оснащение, ИТ-ресурсы).

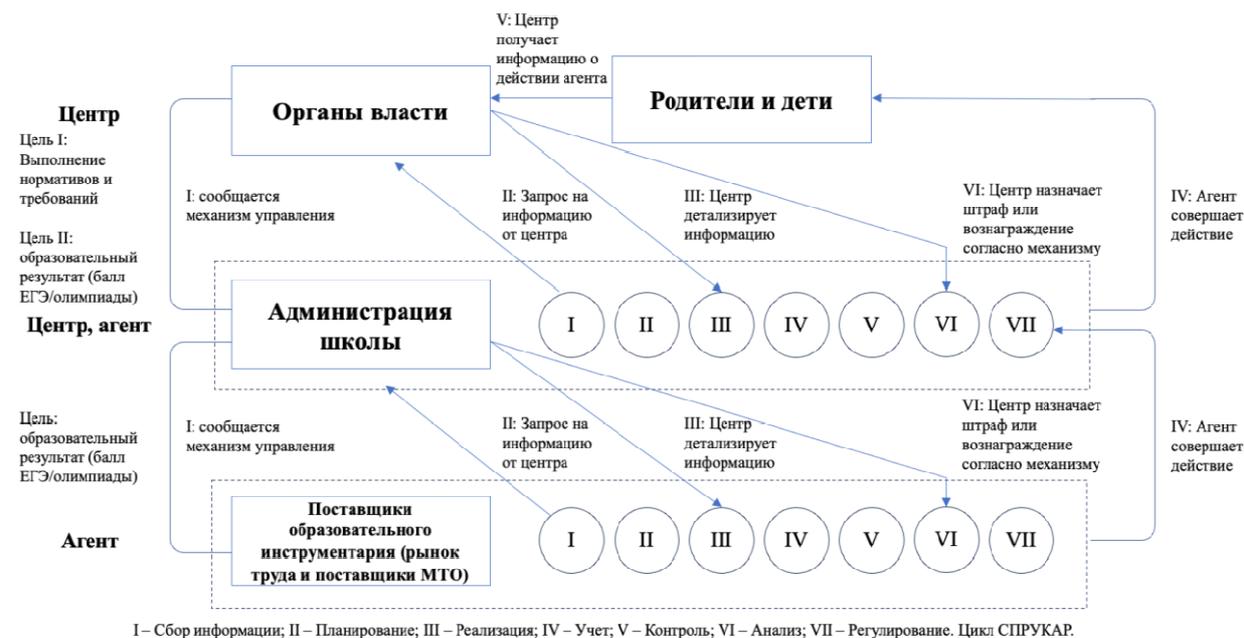


Рис. 1. Рассмотрение школы в рамках методического подхода  
Fig. 1. Consideration of the school within the framework of a methodological approach

Такой подход позволяет учесть влияние внешних нормативов, бюджетных ограничений, требований к образовательным результатам и рыночных условий поставок, что формирует комплексное представление о школе как элементе сложной сети.

Помимо этого, методический подход заключается в описании системы школьного образования с точки зрения математических моделей, в частности, механизмов управления.

Далее в статье более детально рассмотрено взаимодействие школы непосредственно с поставщиками материально-технического оснащения.

## 2. Основные модели взаимодействия школ и поставщиков

Вторым ключевым объектом исследования является отрасль материально-технического обеспечения среднего образования – совокупность производителей, поставщиков, потребителей, государственных органов и других участников, которые создают систему организации оборота и использования трудовых, основных и оборотных средств средних образовательных учреждений (материалов, сырья, полуфабрикатов, машин, учебного и другого оборудования), обеспечивающих образовательный и административно-управленческий процесс. Направление является очень широким, поэтому фокус данной работы сосредоточен на школах и на влиянии различных видов закупок.

Особая значимость материальной базы для образовательных результатов в эпоху современных и цифровых технологий подчеркивается в стратегическом документе «Двенадцать решений для нового образования», разработанном Высшей школой экономики и Центром стратегического развития Российской Федерации [2]. Целью документа является определение механизмов управления в области оборудования в среднем образовании с целью определения функций полезности закупок оборудования в средних образовательных учреждениях.

В связи с этим ключевыми задачами работы являются:

- создание моделей взаимодействия между агентами и центрами в рамках отрасли оборудования в среднем образовании;
- анализ моделей на основе интервью с директорами школ и предприятий;
- декомпозиция целей директоров школ и описание механизмов управления закупками оборудования в школах;
- определение направлений закупок оборудования, которые в наибольшей степени влияют на функцию полезности школ.

В рамках работы авторы формулируют ряд ключевых гипотез.

- Школы принимают решения о закупках самостоятельно, учитывая нормативные акты, а также стремясь максимизировать свои функции полезности.
- Функции полезности школ выражаются в среднем образовательном результате учащихся данной школы.
- Функции полезности школ в отношении оборудования зависят от ряда факторов, включая цену покупки, полезность приобретения конкретного оборудования, а также количество приобретаемого оборудования.
- Закупки учебного оборудования с использованием современных технологий (ИТ, оборудование для проектирования и исследований) оказывают наибольшее влияние на рост функции полезности школ.

В качестве объекта исследования были взяты средние образовательные школы Российской Федерации, за исключением частных школ, из 84 регионов страны. Были получены данные о всех школьных закупках [8] за 2019 и 2020 годы (стоимость каждого лота и каждой единицы приобретенной материальной поддержки), а также для ряда регионов (Санкт-Петербург) были получены данные об образовательных результатах школ (база данных, собранная авторами).

Данные для анализа были собраны с использованием баз данных российской системы государственных закупок [8], баз данных, агрегированных для Министерства промышленности и торговли [3], а также баз данных Единого государственного экзамена в Российской Федерации (в частности, Санкт-Петербурга) [9]. Для проведения интервью с директорами школ и предприятий были использованы контактные базы Фонда развития Физтех-школ и Министерства промышленности и торговли России.

Для проверки первой гипотезы был проведен предварительный анализ нормативных правовых актов и внутренних правил школ [10, 11] для определения механизмов взаимодействия школ и поставщиков учебного оборудования. На основе результатов данной работы было выявлено, что существует три способа приобретения оборудования (рис. 2). Приобретение оборудования школой осуществляется либо в координации с департаментом образования муниципалитета, которому подчиняется школа (процедура закупок I), либо через координацию с департаментом и тендерным комитетом (на основе контролирующего финансового органа) (процедура закупок II). Если объем закупки небольшой, она может быть осуществлена напрямую.



Рис. 2. Базовый процесс проведения закупки  
Fig. 2. The basic procurement process

Для проверки гипотез была сформулирована анкета для директоров школ и предприятий. Она состояла из 17 вопросов и позволила определить функцию полезности школ, опрос был проведен среди 5 директоров школ, а также среди 12 представителей менеджмента компаний – поставщиков материального обеспечения.

Все директора школ отметили важность образовательного результата, выраженного в среднем балле Единого государственного и общего государственного экзаменов в школе, количестве победителей в школьных конкурсах и олимпиадах. Кроме того, в регионах, где департамент образования региона установил систему рейтингов (например, Пермский край, Московская область, Москва), ключевым результатом было улучшение позиции школы в рейтинге. Вес школы в этом рейтинге коррелирует с результатами экзаменов. Это подтверждает вторую гипотезу данной работы, согласно которой функция полезности школы выражается в образовательном результате.

Определим ключевые параметры данной модели (рис. 3). К ним относятся:

- $x$  – количество проданной продукции;
- $p$  – цена единицы проданной продукции;
- $AC$  – издержки производства единицы продукции;
- $q$  – показатель качества продукции,  $q = [0 \dots 1]$ ;
- $QC$  – коэффициент стоимости увеличения качества продукции, измеряемый как издержки на производство самой качественной продукции; по умолчанию считаем, что чем качественнее продукция, тем больше издержки по ее производству;
- $AU$  – коэффициент полезности, который в среднем приносит каждая закупленная единица продукции;
- $\theta(x, plan)$  – гладкая аппроксимация функции Хевисайла («ступенька»), равная 1 (для примера:  $\theta(x, plan) = 0,5 + 0,5 \cdot \tanh(1000 \cdot (x - plan))$ );
- $plan$  – план школы по закупке того или иного оборудования, который должна выполнить школа;
- $g$  – растущая функция.

Школа решает задачу максимизации своего образовательного результата. Полезность рассчитывается в баллах государственного экзамена.

Следующая формула выражает функцию полезности результатов опроса директоров школ:

$$U_{\text{school}} = f(x, plan, p, q) = AU \cdot q \cdot \theta(x, plan) - g(p_i \cdot x). \quad (1)$$

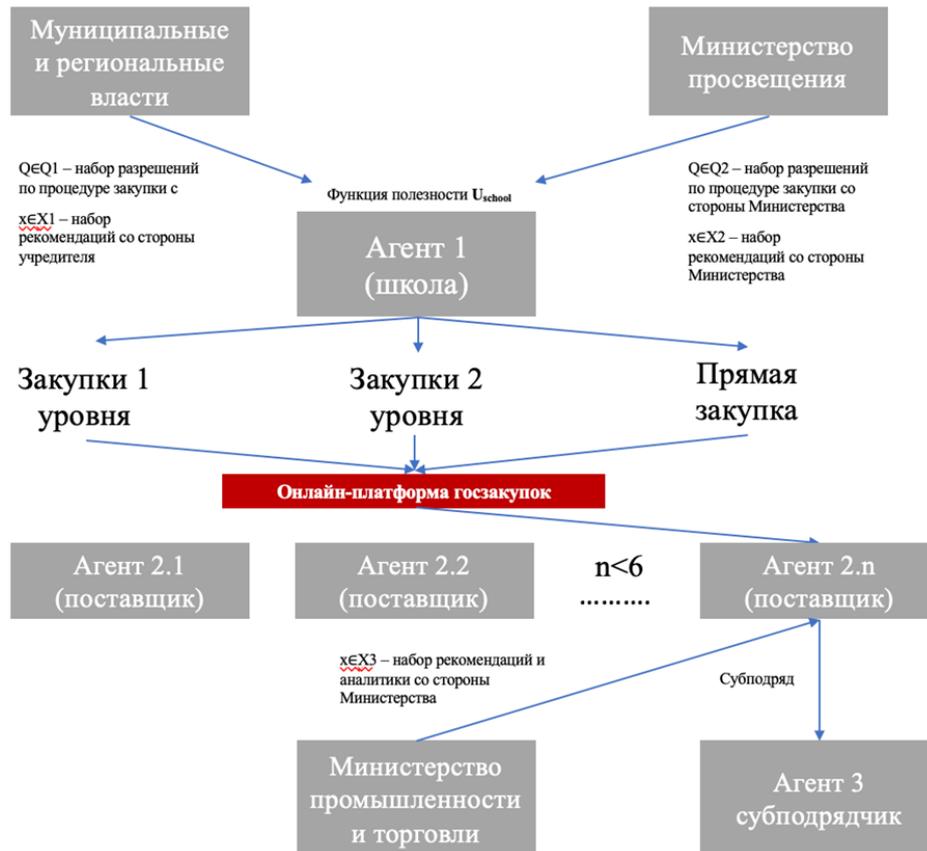


Рис. 3. Наиболее распространенная модель проведения закупки  
Fig. 3. The most common purchase model

Согласно опросам руководства поставщиков и представителей Минпромторга России, поставщики максимизируют свою прибыль (если объем компании невелик) или выручку (если выручка компании превышает 1 млрд рублей). Таким образом, формула полезности основного поставщика выражается следующим образом:

$$x = x_1 + x_2, \quad (2)$$

где  $x_1$  – основной поставщик поставляет сам;  $x_2$  – передает на субконтракт.

Для малых поставщиков функция полезности является прибылью и выражается следующим отношением:

$$U_i = f(x_1, x_2, p_i, AC_i, q) = p_i \cdot (x_1 + x_2) - AC_i \cdot q \cdot (1 + q \cdot QC)x_1 - p_{out} \cdot x_2. \quad (3)$$

Для крупных поставщиков (максимизируют выручку):

$$U_i = f(x, p_i) = p_i \cdot (x_1 + x_2), \quad (4)$$

где  $p_i \cdot (x_1 + x_2) - AC_i \cdot q \cdot (1 + q \cdot QC) \cdot x_1 - p_{out} \cdot x_2 > 0$ .

Аргументы с префиксом «out» относятся к внешним субподрядчикам (например:  $p_{out}$  – это цена  $x_2$ ).

Субподрядчик – это прежде всего мелкий поставщик. Его функция полезности выражается следующим образом:

$$U_{out} = f(x_2, p_{out}, AC_{out}, q) = p_{out} \cdot x_2 - AC_{out} \cdot q \cdot (1 + q \cdot QC) \cdot x_2. \quad (5)$$

Действует следующий механизм закупки. Сначала школа определяет  $plan$ ,  $p_{min}$  закупки,  $p_i$  ( $p_i \geq p_{min}$ ),  $q_{min}$  ( $q \geq q_{min}$ ). Затем индустрия определяет, может ли она произвести товар или нет с качеством  $q \geq q_{min}$ . Оставшиеся поставщики определяют свои  $p_i$  и  $x$  ( $x = x_1 + x_2$ ), зависящие от плана школы и  $p_{min}$ , а также от  $AC_i$  и  $QC$ . Школа рассматривает все предлагаемые цены  $p_i$  и количества  $x$  и определяет поставщика, предложение которого предоставит максимальную функцию полезности. Победивший контрагент передает на субподряд  $x_2$  единицы продукции. Обмен денег и товара в данной модели считаем мгновенным.

Если школа ведет регулярную деятельность и административный состав не нарушает нормативы, требования законодательства и вышестоящих органов управления, то ключевой целью является обеспечение уровня экзаменов или рейтинга школы в регионе. Данный показатель является функцией полезности школы и измеряется в среднем балле школы по результатам Единого государственного экзамена или в рейтинге школы, по которым оценивают эффективность работы учреждения. Важно, что директора связывают количественный уровень баллов экзаменов с тем, какое оборудование стоит у них в школе (при обеспечении школы базовым образовательным оборудованием по нормативам).

Также данный опросник позволил провести декомпозицию целей школ (рис. 4). Школе необходимо обеспечить финансовую стабильность школы (отсутствие долгов, наличие средств для оплаты труда учителей) (блок «Финансы») для осуществления успешного процесса проведения регулярных мероприятий, обеспечения школы необходимой материальной поддержкой (блок «МТО-Снабжение») и укомплектования персоналом (блок «Кадры»).

Выполнение требований вышестоящих инстанций чаще всего сводится к выполнению стандартов в рамках школьных мероприятий и процедур закупок и удовлетворению неформальных требований властей (блок «Нормативы»).

Школа достигает высоких образовательных результатов за счет обеспечения высокого уровня удовлетворенности образовательным процессом среди учащихся и родителей (блок «Обучение»), успешного подбора и финансовой поддержки персонала (блок «Кадры»), а также при наличии профессиональной материальной базы (блок «МТО-Снабжение»).

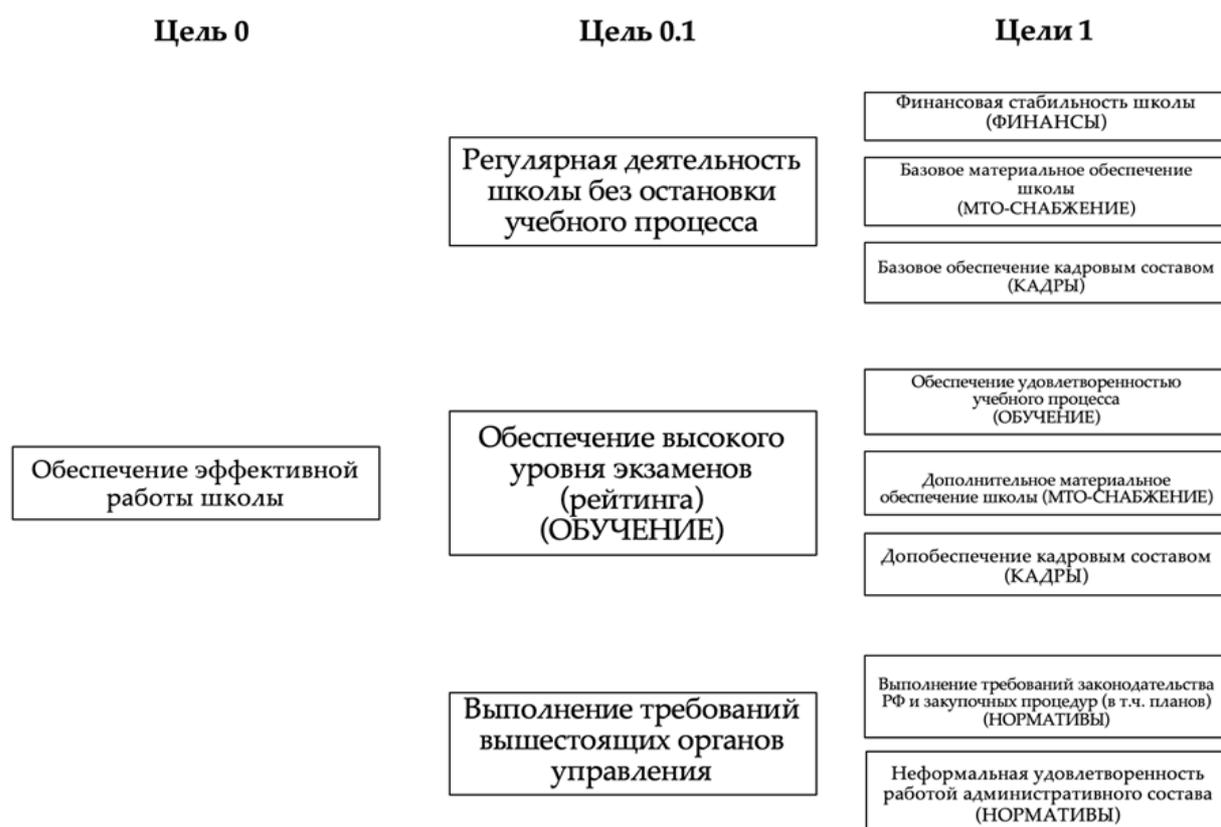


Рис. 4. Первичное дерево целей директора школы  
Fig. 4. Primary goal tree of the school principal

Основываясь на целях уровня 1, можно декомпозировать цели, связанные с оборудованием (рис. 5). Сконцентрируемся в первую очередь на дополнительном материально-техническом обеспечении (считаем, что в школу закуплена основная мебель, доски, компьютеры, которые необходимы для начала учебного процесса, и школа дозакупает оборудование, чтобы повышать свои результаты).



Рис. 5. Декомпозиция целей директора школы касательно дополнительного материального обеспечения школы

Fig. 5. Decomposition of the school principal's goals regarding additional equipment supply for the school

Как мы можем заметить из данной декомпозиции, решающее влияние имеет механизм «затраты – эффект». Рассмотрим его подробнее.

### 3. Механизм «затраты – эффект» в закупках материального обеспечения для школ

Мы видим, что механизм «затраты – эффект» важен в нашей модели. Давайте предположим, что школа может приобрести несколько единиц оборудования, чтобы увеличить образовательный результат. В рамках этой работы мы проанализировали список из более чем 464 видов товаров (на основе Общероссийского классификатора видов экономической деятельности), которые все средние учебные заведения РФ закупали за 2019–2020 годы (данные собраны авторами с российского сайта госзакупок [8]). Мы сгруппировали их в 22 ключевые группы:

- 1) конструкторское и исследовательское оборудование;
- 2) вычислительное оборудование/компьютеры;
- 3) учебная литература и гаджеты;
- 4) мебель;
- 5) офисное оборудование;
- 6) развлечения и игрушки;
- 7) устройства ввода/вывода данных;
- 8) телевизоры, экраны, видео, фотографии;
- 9) спорт;
- 10) предметы изобразительного искусства;
- 11) устройства хранения данных + работа с данными;
- 12) звуковое оборудование;
- 13) предметы для рисования и канцелярские принадлежности;
- 14) столовая/кухня;
- 15) компьютерные программы;
- 16) музыкальные инструменты;
- 17) товары для технологии (мужчины) /строительные инструменты;
- 18) телекоммуникационное оборудование;
- 19) товары для технологии (женщины);
- 20) лабораторное оборудование;
- 21) прочие услуги;
- 22) прочее.

Соответственно, у нас есть 22 варианта расходования средств на материальную базу.

Рассмотрим каждую закупку с точки зрения того, сколько полезности принесет затрата дополнительной единицы средств на единицу определенной продукции [12]. При таком подходе более высокая оценка эффекта покупки на потраченный рубль соответствует более высокому приоритету закупки. Если была проведена оценка средств, которые необходимо потратить на каждую покупку, то в этом случае становится возможным упорядочить существующий список по-

тенциальных инвестиций и определить последовательность их осуществления, сформировав иерархию покупок.

Для понимания процедуры представим, что перед школой есть выбор меньшего числа потенциальных направлений закупки (например, 5, в реальности – 22). Каждое направление закупки может дать фиксированный образовательный результат  $Exam_i$ ,  $i = 1 \dots 5$ . Данные для оценки потенциального влияния той или иной закупки можно получить из количественных данных или экспертной оценки. Тем же самым методом можно оценить издержки на проведение той или иной закупки ( $TC_i$ ).

Эффективность каждой закупки  $E_i$  определяется как отношение оценки на влияние среднего балла за экзамен на затраты.

Мы можем сравнить эффективность закупок, построив графики ниже. Затраты на каждую единицу оборудования отложены по оси абсцисс, а влияние на образовательный результат – по оси ординат. В итоге мы получаем ряд отрезков с началом в нуле и с концом в точке  $(TC_i, Exam_i)$  для  $i$ -й закупки. Эффективность каждой закупки определяется углом наклона отрезка  $Exam_i/b_i$  (рис. 6).

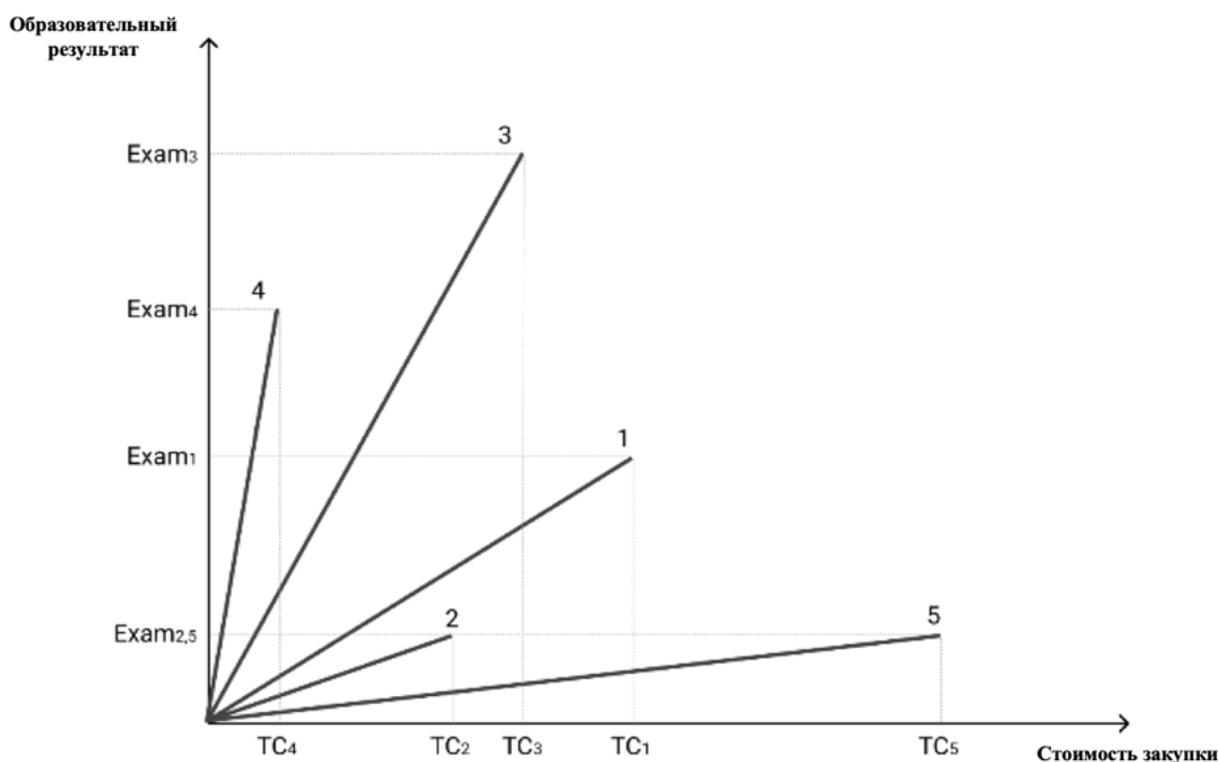


Рис. 6. Эффективность опций в рамках механизма «затраты – эффект»  
Fig. 6. The effectiveness of options within the framework of the cost-effect mechanism

Чем выше вклад той или иной закупки на вложенный рубль, тем эффективнее сначала закупать данное оборудование, а потом последующее (при удовлетворении базовых потребностей школы в данном оборудовании). Таким образом, закупки сортируются по показателям  $\frac{Exam_i}{TC_i}$  и возможно составить суммарный график для проведения закупок в зависимости от рейтинга (рис. 7).

Этот график позволяет определить необходимые затраты на оборудование для достижения конкретного образовательного результата. Как мы видим, построенный график описывает непрерывно возрастающую функцию полезности организации закупок школами. Согласно ему мы можем понять, какое оборудование школа должна приобрести для достижения более высокого образовательного результата.

Модель формулы полезности, представленная в статье, должна быть однофакторной, поэтому она не зависит от других показателей, влияющих на образовательный результат, таких как

заработная плата преподавательского состава или мотивация руководства школы. Однако при прочих равных условиях мы можем использовать построенную модель функции полезности для анализа полезности закупок школами.

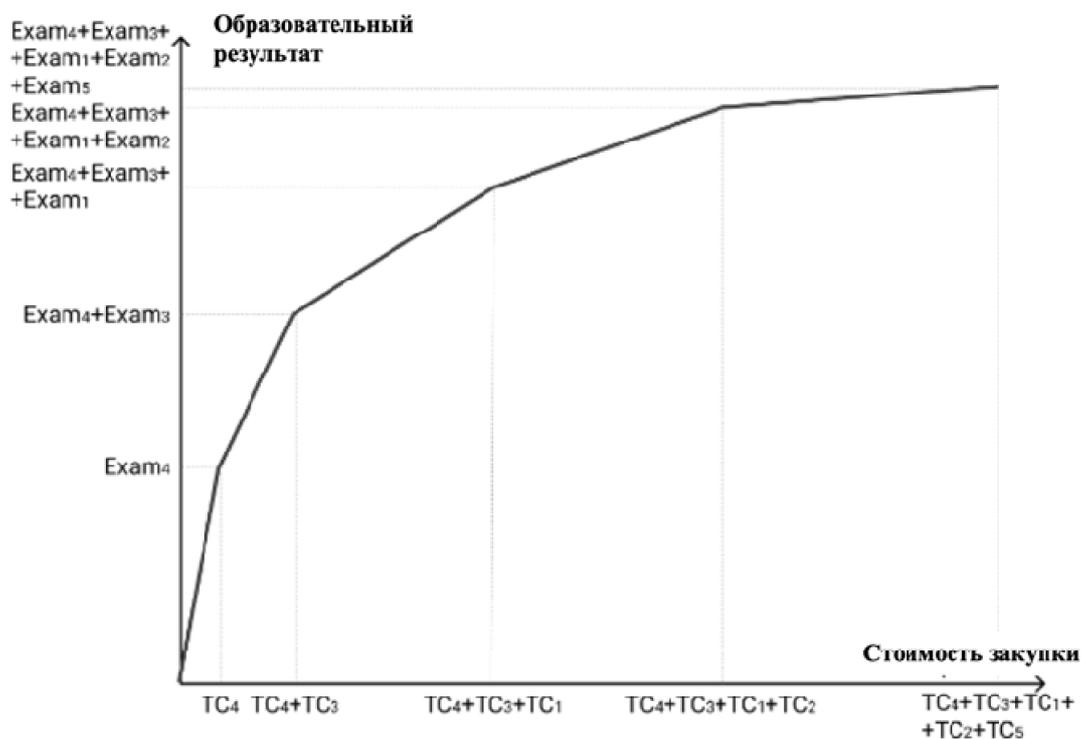


Рис. 7. График зависимости полезности закупки оборудования от трат в рамках механизма «затраты – эффект»

Fig. 7. Utility graph of purchasing equipment on expenses within the framework of the cost-effect mechanism

Следующий шаг – сформулировать гипотезы о том, что школа должна приобрести, чтобы увеличить свою функцию полезности, в первую очередь.

Чтобы понять, какие направления расходов оказывают наиболее существенное влияние на образовательный результат, была использована база данных с количеством учащихся, набравших баллы на Едином государственном экзамене с разной периодичностью по всем школам Санкт-Петербурга, а также данные о закупках этих школ из сервиса государственных закупок. Эта база данных [9] показывает количество выпускников, набравших от 0 до 160 баллов на трех экзаменах, от 161 до 220, от 221 до 250 баллов и от 251 до 300 по Единому государственному экзамену.

Давайте обратим особое внимание на закупки оборудования, влияющие на появление «супербалльников» – учащихся, набравших более 251 балла. Для этого были построены корреляции между количеством супербалльников в школе и стоимостью приобретенного оборудования в указанных выше областях (22 ключевые области). Результаты количественного анализа приведены в таблице.

Как мы видим из результатов количественного анализа, наиболее существенное влияние на появление супербалльников оказывают закупки лабораторного и телекоммуникационного оборудования, а также компьютерных технологий. Эти выводы подтверждаются текущей тенденцией к цифровизации образования и внедрению исследовательских дисциплин, которые играют высокую роль в подготовке школьников. Более того, эти результаты совпадают с качественными исследованиями STEM (наука, технология, инженерия, математика) образования, проведенными ранее [6, 13–15].

Более того, интересно, что покупка учебной литературы практически не влияет на появление суперуказателей, что может свидетельствовать о недостаточном качестве учебной литературы в российских школах.

Корреляции между количеством «супербалльников» в школах Санкт-Петербурга  
и тратами на направления приобретаемого оборудования  
Correlations between the number of «superpointers» in St. Petersburg schools  
and spending on equipment

Категория товара	Корреляция с ЕГЭ
Лабораторное оборудование	0,74
Телевизоры, экраны, видео, фото	0,566
Телекоммуникационное оборудование	0,565
Устройства для хранения данных и работа с данными	0,529
Прочие услуги	0,404
Офисное оборудование	0,36
Вычислительное оборудование/компьютеры	0,28
Компьютерные программы	0,2
Устройства ввода/вывода данных	0,169
Учебная литература и гаджеты	0,139
Спорт	0,119
Развлечения и игрушки	0,11
Мебель	0,0969
Конструкторское и исследовательское оборудование	0,0933
Звуковое оборудование	0,0183
Прочее	-0,0173
Предметы изобразительного искусства	-0,09
Предметы для рисования и канцелярия	-0,09
Столовая/кухня	-0,109
Технология для мальчиков/строительство	-0,109
Технология для девочек	-0,12
Музыкальные инструменты	-0,25

Таким образом, мы можем определить различные области расходов, которые положительно влияют на значения функции полезности школ, что может быть рекомендациями для школ при проведении закупок. В зависимости от влияния покупки на результат обучения школа может оценивать покупки в рамках реализации механизма «затраты – эффект».

### Заключение

В данной статье рассматриваются вопросы определения показателей эффективности закупок школ, полученных на основе декомпозиции целей директоров средних школ, и описание механизмов управления закупками различных видов оборудования, влияющих на жизненно важные результаты.

Для работы была проведена серия интервью с 17 директорами школ и представителями руководства поставщиков, которые показали, что измеримым критическим результатом школы является образовательный результат, измеряемый в средних баллах по экзаменам, а также рейтинг школы в регионе (если существует такая рейтинговая система). Этот критерий становится важным после обеспечения школы необходимым оборудованием. Затем закупается дополнительное оборудование, исходя из влияния на результаты обучения (анализ показал, что школа закупает оборудование 22 расширенных категорий).

В документе также описываются механизмы управления, используемые для обеспечения дополнительной материальной поддержки школы. В рамках работы был выведен тип функции полезности школы в зависимости от приобретения оборудования с использованием механизма «затраты – эффект» и было проанализировано, какие закупки оборудования при прочих равных условиях в наибольшей степени влияют на образовательный результат. К таким направлениям закупок относится прежде всего компьютерное и лабораторное оборудование, позволяющее детям осваивать современные профессии и готовиться к экзаменам. Данная работа носит рекомендательный характер для руководящего состава школ и государственных служб, которые определяют политику в области образования и создания школьного оборудования.

## Список литературы

1. Cuban L., Kirkpatrick H., Peck C. High access and low use of technologies in high school classrooms: Explaining an apparent paradox // *American Educational Research Journal*. 2001. Vol. 38 (4). P. 813–834. DOI: 10.3102/00028312038004813
2. Двенадцать решений для нового образования: доклад Центра стратегических разработок и Высшей школы экономики / под ред. Я.И. Кузьмина, И.Д. Фрумина. М.: Центр стратегических разработок; Высшая школа экономики, 2018. 105 с.
3. Прогноз потребности образовательных учреждений в учебном оборудовании // Физтех-Центр: сайт. URL: <https://phystech-center.ru/projects> (дата обращения: 15.04.2021).
4. Hakkarainen K., Ilomäki L., Lipponen L. Students' skills and practices of using ICT: Results of a national assessment in Finland // *Computers & Education*. 2000. Vol. 34 (2). P. 103–117. DOI: 10.1016/S0360-1315(00)00007-5
5. Liang F. Management of physical education classroom teaching in the context of big data // *ACM International Conference Proceeding Series*. 2022. Vol. 18 (2). P. 1400–1404. DOI: 10.1145/3482632.3483160
6. A systematic review of STEM education research in the GCC countries: Trends, gaps, and barriers / F. Kayan-Fadlelmula, A. Sellami, N. Abdelkader, S. Umer // *International Journal of STEM Education*. 2022. Vol. 9 (1). P. 2. DOI: 10.1186/s40594-021-00319-7
7. Модели управления общеобразовательной организацией в условиях реформ: опыт социологического анализа / Н. Г. Фархатдинов, Н. В. Евстигнеева, Д. Ю. Куракин, В. М. Малик // *Вопросы образования*. 2015. № 2. С. 196–219. DOI: 10.17323/1814-9545-2015-2-196-219
8. Единая информационная система в сфере закупок: официальный сайт. URL: <https://zakupki.gov.ru> (дата обращения: 10.04.2021).
9. Официальный информационный портал государственной итоговой аттестации выпускников 9 и 11 классов в Санкт-Петербурге. URL: [https://www.ege.spb.ru/index.php?option=com\\_k2&view=item&layout=item&id=865&Itemid=230](https://www.ege.spb.ru/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=865&Itemid=230) (дата обращения: 10.11.2021).
10. Российская Федерация. Федеральный закон «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц» от 18.07.2011 N 223-ФЗ.
11. Российская Федерация. Федеральный закон «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» от 05.04.2013 N 44-ФЗ.
12. Механизмы управления / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, М.В. Губко и др. М.: УРСС, 2011.
13. Digital Technologies in Public Procurement Logistics / V.V. Borisova, A.A. Lysochenko, G.A. Vorobyev et al. // *Modern Global Economic System: Evolutional Development vs. Revolutionary Leap. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 198. Springer, Cham, 2021. P. 1394–1402. DOI: 10.1007/978-3-030-69415-9\_154
14. Федеральный государственный образовательный стандарт. URL: <https://fgos.ru> (дата обращения: 10.11.2021).
15. Российская Федерация. Федеральный закон от 10 апреля 2000 г. N 51-ФЗ «Об утверждении Федеральной программы развития образования» (в редакции от 03.08.2018).

## References

1. Cuban L., Kirkpatrick H., Peck C. High access and low use of technologies in high school classrooms: Explaining an apparent paradox. *American Educational Research Journal*. 2001;38(4):813–834. DOI: 10.3102/00028312038004813
2. Kuz'minov Ya.I., Frumin I.D. (Eds.). *Dvenadtsat' resheniy dlya novogo obrazovaniya: doklad Tsentra strategicheskikh razrabotok i Vysshey shkoly ekonomiki* [Twelve Solutions for New Education: A Report by the Center for Strategic Research and the Higher School of Economics]. Moscow: Center for Strategic Research; Higher School of Economics; 2018. 105 p. (In Russ.)
3. *Prognoz potrebnosti obrazovatel'nykh uchrezhdeniy v uchebnom oborudovanii* [Predicting model for the needs of educational institutions in educational equipment]. *Phystech-Center: website*. (In Russ.) Available at: <https://phystech-center.ru/projects> (accessed 15.04.2021).
4. Hakkarainen K., Ilomäki L., Lipponen L. Students' skills and practices of using ICT: Results of a national assessment in Finland. *Computers & Education*. 2000;34(2):103–117. DOI: 10.1016/S0360-1315(00)00007-5
5. Liang F. Management of physical education classroom teaching in the context of big data. *ACM International Conference Proceeding Series*. 2022;18(2):1400–1404. DOI: 10.1145/3482632.3483160

6. Kayan-Fadlelmula F., Sellami A., Abdelkader N., Umer S. A systematic review of STEM education research in the GCC countries: Trends, gaps, and barriers. *International Journal of STEM Education*. 2022;9(1). P. 2. DOI: 10.1186/s40594-021-00319-7

7. Farkhatdinov N.G., Kurakin D. Yu., Evstigneeva N. V., Malik V.M. Patterns of Managing Secondary Schools under Reforms: Sociological Analysis Experience. *Educational Studies*. Moscow. 2015;(2):196–219. DOI: 10.17323/1814-9545-2015-2-196-219

8. *Edinaya informatsionnaya sistema v sfere zakupok: ofitsial'nyy sayt* [Unified information system in the sphere of procurement: official website]. (In Russ.) Available at: <https://zakupki.gov.ru> (accessed 10.04.2021).

9. *Ofitsial'nyy informatsionnyy portal gosudarstvennoy itogovoy attestatsii vypusknikov 9 i 11 klassov v Sankt-Peterburge* [Official information portal of the state final certification of graduates of grades 9 and 11 in St. Petersburg]. (In Russ.) Available at: [https://www.ege.spb.ru/index.php?option=com\\_k2&view=item&layout=item&id=865&Itemid=230](https://www.ege.spb.ru/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=865&Itemid=230) (accessed 10.11.2021).

10. *Rossiyskaya Federatsiya. Federal'nyy zakon "O zakupkakh tovarov, rabot, uslug otdel'nymi vidami yuridicheskikh lits" ot 18.07.2011 N 223-FZ* [Russian Federation. Federal Law "On the procurement of goods, works, services by certain types of legal entities" dated 18.07.2011 No. 223-FZ]. (In Russ.)

11. *Rossiyskaya Federatsiya. Federal'nyy zakon "O kontraktной системе v sfere zakupok tovarov, rabot, uslug dlya obespecheniya gosudarstvennykh i munitsipal'nykh nuzhd" ot 05.04.2013 N 44-FZ* [Russian Federation. Federal Law "On the contract system in the sphere of procurement of goods, works, services to meet state and municipal needs" dated 05.04.2013 No. 44-FZ]. (In Russ.)

12. Burkov V.N., Burkova I.V., Gubko M.V. et al. *Mekhanizmy upravleniya* [Management mechanisms]. Moscow: URSS Publ., 2011. (In Russ.)

13. Borisova V.V., Lysochenko A.A., Vorobyev G.A., Pavlenko I.I., Avsharov A.G. Digital Technologies in Public Procurement Logistics. In: *Modern Global Economic System: Evolutional Development vs. Revolutionary Leap. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 198. Springer, Cham, 2021. P. 1394–1402. DOI: 10.1007/978-3-030-69415-9\_154

14. *Federal'nyy gosudarstvennyy obrazovatel'nyy standart* [Federal state education standard]. (In Russ.) Available at: <https://fgos.ru> (accessed 10.11.2021).

15. *Rossiyskaya Federatsiya. Federal'nyy zakon ot 10 aprelya 2000 g. N 51-FZ "Ob utverzhdenii Federal'noy programmy razvitiya obrazovaniya" (v redaktsii ot 03.08.2018)* [Russian Federation. Federal Law of April 10, 2000 N 51-FZ "On Approval of the Federal Program for Education Development" (as amended on August 3, 2018)]. (In Russ.)

#### **Информация об авторах**

**Богданов Андрей Дмитриевич**, заведующий лабораторией нейротехнологий и человеко-машинного взаимодействия, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия; [andrey.bogdanov@phystech.edu](mailto:andrey.bogdanov@phystech.edu).

**Щепкин Александр Васильевич**, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Россия; [av\\_shch@mail.ru](mailto:av_shch@mail.ru).

#### **Information about the authors**

**Andrei D. Bogdanov**, Head of the Laboratory of Neurotechnology and Human-Machine Interaction, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia; [andrey.bogdanov@phystech.edu](mailto:andrey.bogdanov@phystech.edu).

**Alexander V. Tschepkin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; [av\\_shch@mail.ru](mailto:av_shch@mail.ru).

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

**Статья поступила в редакцию 17.03.2025**

**The article was submitted 17.03.2025**

## МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ НАУКОЕМКИМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

**О.В. Логиновский**, [loginovskii@susu.ru](mailto:loginovskii@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

**В.А. Белякова**, [beliakovava@susu.ru](mailto:beliakovava@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2273-2619>

*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*

**Аннотация.** Представлена модель управления наукоемким производством на основе технологии цифровых двойников, объединяющая архитектуру озера данных и принципы онтологической инженерии и агентно-сервисного подхода. В исследовании рассматриваются проблемы управления сложными производственными средами в контексте Индустрии 4.0, предлагается гибридный подход, сочетающий принципы «умной фабрики» с методологиями бережливого производства. Модель включает в себя многоуровневую архитектуру, охватывающую стратегический, тактический и операционный уровни, поддерживаемую структурой агент-сервис для системной интеграции. **Цель** работы заключается в разработке комплексной модели управления наукоемким производством на основе интеграции технологии цифровых двойников, онтологического подхода и агентно-сервисной архитектуры с использованием озера данных. **Методы.** Методология исследования использует системный подход к управлению данными с помощью структурированных хранилищ данных и электронных паспортов, используя нечеткие онтологии для формализации знаний. **Результаты.** Реализация продемонстрирована на примере многомасштабного моделирования химических материалов и соединений, где эффективность модели оценивается количественно. Результаты свидетельствуют о значительном повышении производительности, особенно в операциях поиска данных, поскольку протоколы структурированного поиска демонстрируют более высокую эффективность по сравнению с традиционными подходами. **Заключение.** Полученные результаты показывают, что интеграция цифровых двойников с онтологическими структурами и архитектурами агентского обслуживания обеспечивает расширенные возможности оперативного контроля и принятия решений в высокотехнологичных производственных средах. Практическое применение модели демонстрирует ее масштабируемость и адаптивность в различных отраслях промышленности, способствуя как теоретическому пониманию, так и практическому внедрению передовых производственных систем. Это исследование развивает область управления высокотехнологичным производством, предоставляя структурированную основу для цифровой трансформации производственных операций.

**Ключевые слова:** наукоемкое производство, модель управления, цифровой двойник, озеро данных, онтологический инжиниринг, агентно-сервисный подход, принятие решений

**Для цитирования:** Логиновский О.В., Белякова В.А. Модель управления наукоемким производством на основе технологии цифровых двойников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 95–106. DOI: 10.14529/ctcr250209

Original article  
DOI: 10.14529/ctcr250209

## DIGITAL TWIN-BASED MANAGEMENT MODEL FOR HIGH-TECH PRODUCTION

**O.V. Loginovskiy**, [loginovskii@susu.ru](mailto:loginovskii@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

**V.A. Beliakova**, [beliakovava@susu.ru](mailto:beliakovava@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2273-2619>

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

**Abstract.** A management model for high-tech production based on digital twin technology is presented, combining the architecture of a data lake and the principles of ontological engineering and an agent-based service approach. The study examines the problems of managing complex production environments in the context of Industry 4.0, and suggests a hybrid approach combining the principles of a “smart factory”

with lean manufacturing methodologies. The model includes a multi-level architecture covering strategic, tactical and operational levels, supported by an agent-service structure for system integration. The **aim** of the work is to develop an integrated management model for high-tech production based on the integration of digital twin technology, an ontological approach, and an agent-service architecture using a data lake. **Methods.** The research methodology uses a systematic approach to data management using data lake and electronic passports, and fuzzy ontologies to formalize knowledge. **Results.** The implementation is demonstrated on the example of multiscale modeling of chemical materials and compounds, where the effectiveness of the model is quantified. The results indicate a significant increase in productivity, especially in data retrieval operations, as structured search protocols demonstrate higher efficiency compared to traditional approaches. **Conclusion.** The results show that integration of digital twins with ontological structures and architectures of agency services provides enhanced operational control and decision-making capabilities in high-tech production environments. The practical application of the model demonstrates its scalability and adaptability in various industries, contributing to both theoretical understanding and practical implementation of advanced production systems. This research develops the field of high-tech production management by providing a structured framework for the digital transformation of production operations.

**Keywords:** high-tech production, management model, digital twin, data lake, ontological engineering, agent-service approach, decision-making

**For citation:** Loginovskiy O.V., Beliakova V.A. Digital twin-based management model for high-tech production. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(2):95–106. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250209

## Введение

Развитие наукоемкого производства в России характеризуется высокой степенью технологического прогресса и внедрения в различных отраслях. За последние годы российский производственный сектор претерпел значительные преобразования, при этом особое внимание уделяется интеграции цифровых технологий и современным методам производства [1, 2], что, в свою очередь, требует совершенствования моделей и алгоритмов управления.

Значительный прогресс в области контроля и оптимизации наукоемкого производства представляет интеграция технологии цифровых двойников в модели управления. Эта интеграция создает всеобъемлющую основу для принятия решений и оптимизации процессов в режиме реального времени, коренным образом трансформируя традиционные подходы к управлению производством [3].

В условиях Индустрии 4.0 наукоемкие предприятия в основном применяют модели управления, основанные на данных, поступающих от приборов и датчиков. Таким образом, для повышения быстродействия доступа и обработки необходимо иметь оптимальную систему хранения, а также алгоритмы поиска и обработки больших массивов данных в режиме реального времени.

Однако данные, поступающие через Интернет вещей, могут быть неструктурированными или частично структурированными, а также формат выходных файлов может отличаться в зависимости от модели оборудования.

Оптимальным способом хранения неструктурированной или частично структурированной информации является озеро данных и система электронных паспортов изделий, приборов и процессов, образующих онтологические структуры и сущности.

Представление знаний в среде цифровых двойников существенно выигрывает от использования онтологических структур. Онтологии предметной области, интегрированные с моделями цифровых двойников, обеспечивают повышенную семантическую ясность и улучшенные взаимосвязи данных, что приводит к более эффективной передаче знаний и пониманию процессов [4].

Такая интеграция оказывается особенно ценной в сложных производственных условиях, где точное определение взаимосвязей и представление знаний имеют решающее значение.

Таким образом, **цель** работы заключается в разработке модели управления наукоемким производством на основе интеграции технологии цифровых двойников, онтологического подхода и агентно-сервисной архитектуры с использованием озера данных.

**Методы**

Основой модели управления наукоемким предприятием является гибридная модель, основанная на принципах «умной фабрики» и бережливого производства, подразумевающих использование киберсистем и Интернета вещей.

Здесь ключевым объектом является система поддержки принятия решений, основанная на технологии цифровых двойников. Поскольку эта гибридная модель относится к разряду моделей, основанных на данных, то в роли хранилища данных выступает озеро данных и система электронных паспортов, онтологически связывающая сущности цифрового двойника. Взаимодействие между уровнями модели, а также между доменами цифрового двойника организовано с помощью агентно-сервисного подхода.

**Основная часть**

Внедрение цифровых моделей управления на основе двойников, включающих онтологические структуры и агентно-сервисные архитектуры, требует применения структурированного иерархического подхода. Эта многоуровневая структура обеспечивает всестороннюю интеграцию различных функций управления при сохранении операционной согласованности и стратегического согласования. Томпсон и Родригес демонстрируют, что эффективная реализация модели требует тщательного учета иерархических связей и функциональных зависимостей на всех уровнях организации [5]. Структура модели управления представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура модели управления наукоемким производством  
 Fig. 1. Structure of high-tech production management model

Стратегический уровень охватывает цели всего предприятия и механизмы принятия решений. Этот уровень облегчает долгосрочное планирование и стратегии распределения ресурсов, устанавливая базовые параметры для операций более низкого уровня [6]. Функции стратегического уровня существенно влияют на общую эффективность системы и результаты деятельности организации.

Внедрение на тактическом уровне направлено на удовлетворение промежуточных требований к оперативному управлению. Этот уровень координирует оптимизацию производственного планирования и управление использованием ресурсов, устраняя разрыв между стратегическими целями и операционной деятельностью [7].

Операционный уровень ориентирован на повседневную производственную деятельность и функции непосредственного контроля. Андерсон и др. приводят доказательства того, что этот уровень требует надежной интеграции систем управления технологическими процессами в ре-

жиме реального времени и управления цехами [8]. Их исследования демонстрируют важность функциональности на операционном уровне для поддержания эффективности производства и контроля качества.

Архитектура интеграции озера данных (рис. 2) представляет собой фундаментальный компонент структуры модели. Комплексные системы интеграции данных должны поддерживать многоуровневый поток информации, включая сбор данных с датчиков и возможности мониторинга в режиме реального времени [9].

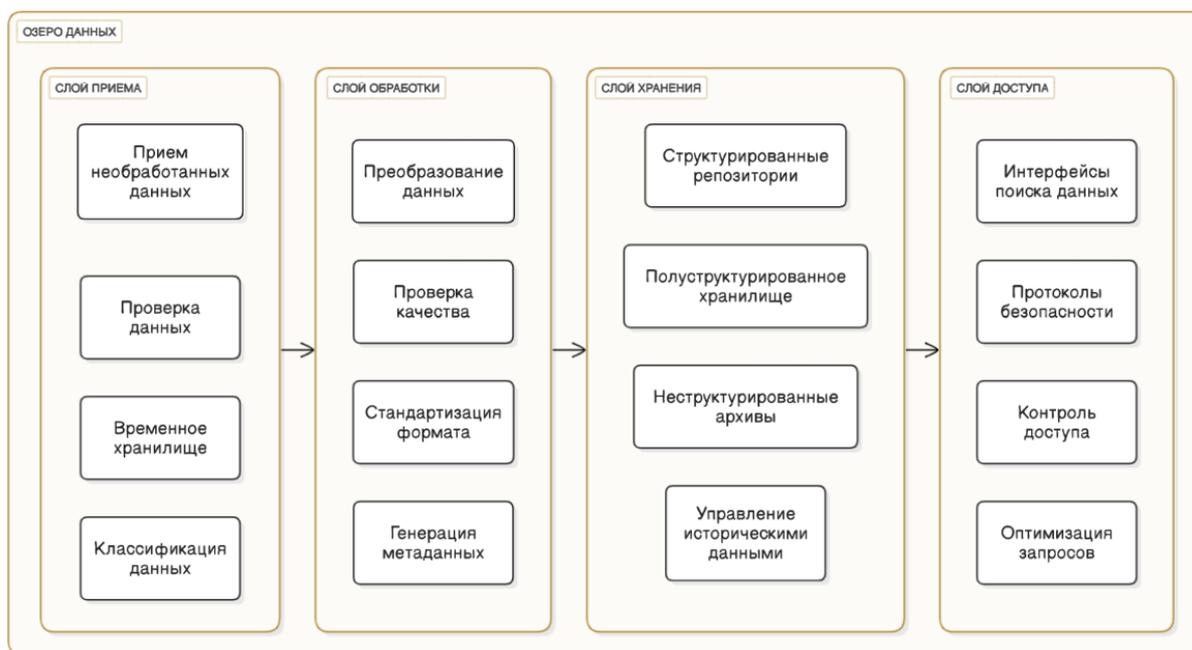


Рис. 2. Структура озера данных  
Fig. 2. Data lake structure

Слой приема представляет собой начальную точку входа для всех данных, поступающих в озеро промышленных данных. Этот слой обрабатывает потоки неструктурированных данных от производственного оборудования, корпоративных систем и внешних источников, реализуя предварительные проверки достоверности при сохранении исходного формата и целостности данных [5]. Слой обеспечивает соответствие входящих данных базовым стандартам качества и включает необходимые метаданные для отслеживания и обработки.

Слой обработки преобразует необработанные данные в пригодную для использования информацию посредством процедур стандартизации и обогащения. Данный слой применяет алгоритмы преобразования, проверки качества и процессы обогащения для подготовки данных к анализу и использованию [10]. Слой обработки управляет требованиями как к обработке в реальном времени, так и к пакетной обработке, обеспечивая соответствие данных организационным стандартам и наличие необходимой контекстной информации.

Слой хранения поддерживает организованное хранилище обработанных данных, поддерживая различные форматы данных и схемы доступа. Данный слой управляет версионностью данных, историческими архивами и отображением взаимосвязей, обеспечивая при этом эффективные возможности извлечения данных [11]. Архитектура хранения вмещает структурированные, полуструктурированные и неструктурированные данные, поддерживая взаимосвязи и контекст между различными типами данных.

Слой доступа обеспечивает использование данных в различных производственных приложениях и для аналитических требований. Данный слой предоставляет интерфейсы для извлечения данных, аналитических операций и синхронизации цифровых двойников, поддерживая при этом соответствующие меры безопасности и ограничения доступа [12]. Слой доступа поддерживает множество схем использования – от операционных запросов в реальном времени до сложной аналитической обработки.

Слои, описанные выше, работают вместе, создавая целостную среду управления данными, поддерживающую различные производственные операции и аналитические требования [9]. Интегрированная структура обеспечивает эффективный поток данных при сохранении качества данных и операционной гибкости, в конечном итоге поддерживая передовые производственные возможности и процессы принятия решений.

Онтологический уровень устанавливает семантические структуры и иерархии взаимосвязей, необходимые для функционирования системы. Уилсон и др. предполагают, что этот уровень должен включать сложные структуры представления знаний и механизмы логического вывода [13]. Их исследования показывают, что надежные онтологические структуры вносят значительный вклад в системный интеллект и возможности принятия решений. Агрегирующим элементом онтологических сущностей цифрового двойника и элементов системы управления является цифровой паспорт, хранящий техническую информацию, исторические, промышленные, расчетные и прочие данные.

Ввиду неоднородности промышленных данных, поступающих в озеро данных, удобно применять нечеткие онтологии как комплексную систему формализации знаний, интегрирующую классическую онтологическую модель с теорией нечетких множеств [14, 15].

В основе данного подхода лежит математический аппарат, позволяющий оперировать неточными и неопределенными понятиями, где каждому элементу  $x$  из универсального множества  $X$  ставится в соответствие степень принадлежности  $\mu(x) \in [0, 1]$ .

Теоретический базис нечетких онтологий формируется на основе интеграции формальной семантики дескрипционной логики и методологии Fuzzy OWL [16]. Ключевыми структурными элементами выступают нечеткие классы, отношения и экземпляры, описываемые через функции принадлежности  $\mu(t, k)$ , где  $t$  представляет термин предметной области, а  $k$  – соответствующую лингвистическую переменную.

В контексте логического вывода степень уверенности в полученном результате определяется выражением

$$S_{rule} = \prod_{i=1}^l \mu(t_i, k_i), \quad (1)$$

где  $l$  – количество термов в правиле, а нормализация показателей осуществляется через

$$S_{nNorm} = \frac{S_n}{\max(S_n)}, \quad (2)$$

где  $S_{nNorm}$  – нормализованное значение степени уверенности рекомендации каждого  $n$ -го правила.

Практическая реализация нечетких онтологий осуществляется через механизмы интеграции с OWL DL и применение SWRL-правил. Формальное описание нечеткого отношения  $R$  между классами  $A$  и  $B$  может быть представлено как

$$R: A \times B \rightarrow [0, 1]. \quad (3)$$

Данный подход позволяет существенно расширить возможности традиционных онтологий в контексте обработки неопределенных данных. При этом каждому аксиоматическому утверждению  $\phi$  ставится в соответствие степень истинности  $\alpha$ , что формально записывается как  $\langle \phi, \alpha \rangle$ .

В условиях современных производственных систем Индустрии 4.0 нечеткие онтологии обеспечивают более гибкий подход к моделированию предметной области. Они позволяют формализовать экспертные знания с учетом неопределенности и субъективности оценок, что особенно важно при построении интеллектуальных систем управления производством.

Эффективность применения нечетких онтологий проявляется в повышении адекватности моделирования сложных систем, где классический булев подход  $\{0, 1\}$  оказывается недостаточным для описания реальных процессов. Использование лингвистических переменных и функций принадлежности позволяет более точно отразить экспертные знания и обеспечить более качественный логический вывод в системах поддержки принятия решений [17–19].

Внедрение агентно-сервисной архитектуры обеспечивает динамические операционные возможности благодаря автономным агентам и механизмам управления сервисами. Исследование [20] подчеркивает важность четко определенных протоколов связи и механизмов координации для

поддержания эффективности системы. Интеграция агента и сервиса значительно повышает адаптивность системы и оперативность реагирования [21].

Уровень контроля и мониторинга обеспечивает непрерывную оптимизацию системы и управление производительностью. Комплексные системы мониторинга должны включать механизмы отслеживания производительности и обеспечения качества [22]. Эффективные системы контроля необходимы для поддержания высокого уровня операционной эффективности.

### **Реализация**

Рассмотрим реализацию описанной выше модели на примере системы поддержки принятия решений в системе многомасштабного моделирования для озера данных цифровых двойников химических материалов и соединений.

Многомасштабное моделирование в современной науке о материалах сталкивается с фундаментальными проблемами обработки, анализа и хранения массивов больших данных. В рамках исследований по материаловедению накапливаются значительные объемы информации, полученной как экспериментальным путем, так и посредством теоретических расчетов.

Для эффективного управления подобными наборами данных требуется специализированная архитектура хранилища. Учитывая неструктурированный или частично структурированный характер данных, оптимальным решением является применение концепции озера данных. Данный подход обеспечивает необходимую гибкость при работе с разнородной информацией из множества независимых источников.

В контексте междисциплинарных исследований на стыке химии и материаловедения особую значимость приобретает систематизация следующих типов данных [23]:

- структурная информация;
- свойства материалов;
- корреляционные зависимости;
- методология теоретического моделирования;
- результаты экспериментальных измерений.

Особого внимания заслуживает моделирование многокомпонентных систем, включающих полимерные соединения, реакционные смеси, сокристаллы.

Методологический инструментарий включает молекулярную динамику, квантово-химические расчеты, методы химической кинетики.

В рамках оптимизации процессов поиска и обработки данных разработан электронный паспорт материалов как структурный элемент цифрового двойника. Паспорт представляет собой комплекс атрибутивных полей, характеризующих композиционный состав, структурные параметры, расчетные и экспериментальные свойства, реакционную способность, построенные модели и закономерности «структура – свойство», реализующий пространство онтологий и связей.

Техническая реализация электронного паспорта осуществляется посредством JSON-объектов (рис. 3), интегрирующих данные из Crystal и Cif файлов, а также результаты расчетов метадинамики. Данная архитектура обеспечивает экспорт данных, методологическую документацию, возможность ручного ввода, интеграцию с библиографическими источниками.

Эффективная обработка данных требует специальной предварительной обработки. В результате дальнейший анализ данных будет более продуктивным. В нашем случае данные предлагается структурировать и хранить в реляционной базе данных. Структура предлагаемой реляционной базы данных показана на рис. 4.

Изначально экспериментальные данные представляют собой набор неструктурированных выходных файлов. Такие данные невозможно сохранить в реляционной базе данных. Поиск и анализ также невозможны.

Методология оптимизации процедур поиска в озерах данных основана на применении агентов-сервисов. Агент транспортного уровня работает со сбором экспериментальных данных через множество каналов. Эти предварительные данные существуют в неструктурированном формате, преимущественно состоящем из выходных файлов различных химических экспериментальных процедур. Эти файлы содержат всестороннюю информацию о свойствах материалов и характеристиках соединений.

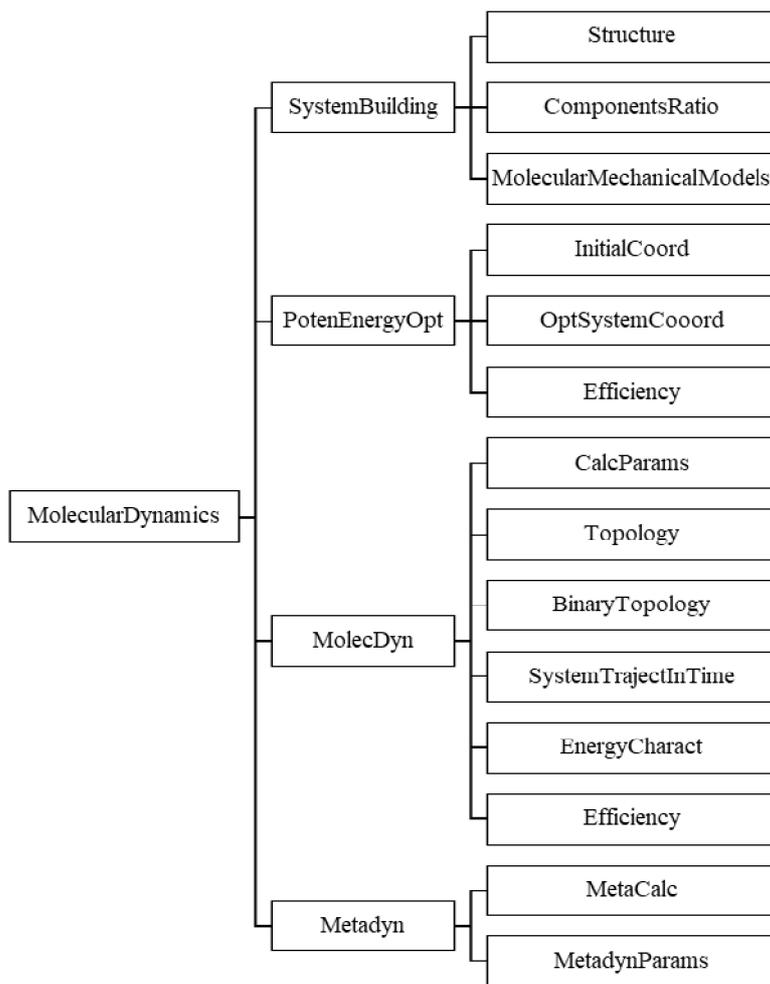


Рис. 3. Структура JSON-объекта для молекулярно-динамических расчетов  
 Fig. 3. JSON object structure for molecular dynamics calculations

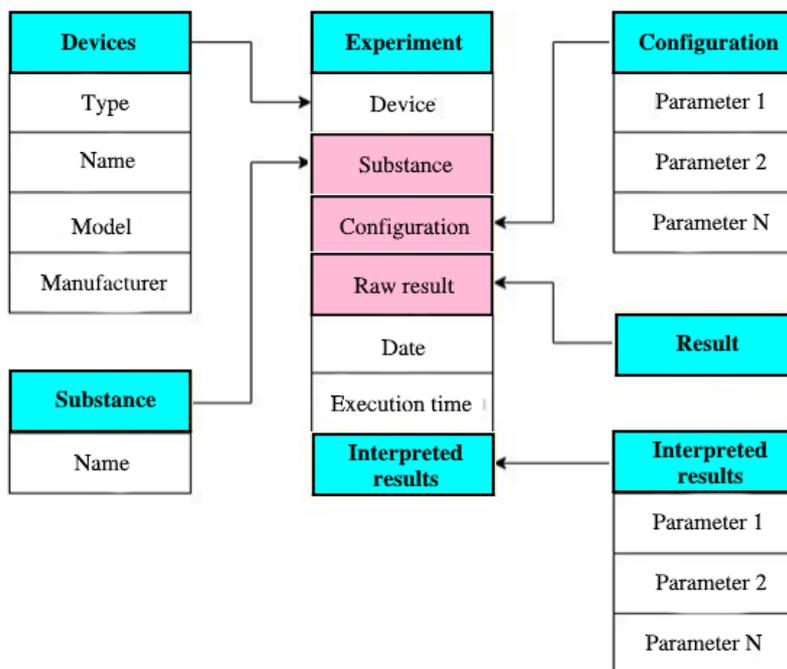


Рис. 4. Пример структуры базы данных результатов химических экспериментов  
 Fig. 4. Example of database structure for chemical experiment results

Агент-сервис трансформации включает систематическое преобразование неструктурированных данных в организованные форматы. Реализация использует архитектуру JSON (JavaScript Object Notation), облегчая организацию трех фундаментальных структурных компонентов: данные кристаллографической структуры, данные кристаллографического информационного файла (CIF) и результаты вычислений молекулярной динамики.

Архитектура базы данных использует двойной системный подход, включающий реляционные и нереляционные системы баз данных. Реализация реляционной базы данных через PostgreSQL обеспечивает возможности структурированных запросов и управление индексируемыми атрибутами. Одновременно реализация нереляционной базы данных через HBase использует структурную организацию семейства столбцов, оптимизированную для распределенного управления данными агентом-парсером выходных файлов.

Структурированный протокол поиска использует архитектуру индексируемых JSON-файлов, демонстрирует логарифмическую сложность  $O(\log(n))$ , реализует организацию на основе атрибутов и показывает превосходные метрики производительности по сравнению с неструктурированным протоколом поиска, который использует необработанные файлы, демонстрируя линейную вычислительную сложность, что требует увеличенных вычислительных ресурсов и показывает сниженную эффективность производительности (см. таблицу).

Время поиска структурированных и неструктурированных файлов  
Search time for structured and unstructured files

Количество файлов	Время поиска, мс	
	Структурированные файлы	Неструктурированные файлы
100	0,1	496,8
1 000	0,7	4 583,6
5 000	3	25 975,6
10 000	5,8	47 565,6
15 000	8,8	69 502,8
20 000	11,3	91 524,7
25 000	14,3	113 184,5
30 000	16,6	156 251,3

Эмпирический анализ выявляет значительные различия в производительности между этими подходами. Структурированные протоколы поиска демонстрируют время отклика на уровне миллисекунд, в то время как неструктурированные протоколы поиска требуют обработки на уровне секунд и минут. Примечательно, что разница в производительности увеличивается пропорционально расширению объема данных. Реализация структурированных протоколов поиска демонстрирует превосходную эффективность в операциях извлечения данных в среде озер данных цифровых двойников.

Эта комплексная методология обеспечивает надежную основу для оптимизации процедур поиска в системах управления химическими данными, особенно в контексте реализаций цифровых двойников. Подход значительно повышает доступность данных и эффективность обработки, что является критически важными факторами в современных средах химических исследований и анализа.

Применение методологии оптимизации поисковых процедур в металлургии и наукоемком производстве представляет собой перспективное направление цифровой трансформации промышленности. В контексте металлургического производства данная методология позволяет существенно оптимизировать работу с данными о составах сплавов и их свойствах, обеспечивая эффективный анализ технологических режимов плавки и обработки металлов. Особую значимость представляет возможность осуществления контроля качества продукции на основе накопленных данных и прогнозирования свойств новых материалов.

Данный пример нетрудно масштабировать на другие области знаний и области применения. В сфере наукоемкого производства внедрение структурированного поиска способствует совершенствованию организации данных о технологических процессах и управлению информацией

о сложном оборудовании. Это позволяет осуществлять комплексную оптимизацию производственных циклов и обеспечивать высокоэффективный контроль качества продукции. Существенным преимуществом является возможность реализации предиктивного обслуживания оборудования на основе анализа накопленных данных.

Практическая значимость внедрения данной методологии выражается в значительном сокращении времени поиска технологических решений и повышении точности подбора параметров производства. Анализ исторических данных способствует улучшению качества продукции и оптимизации использования ресурсов, что приводит к существенному снижению производственных издержек.

Особую ценность представляет возможность создания цифровых двойников производственных линий, технологических процессов и отдельных агрегатов. Данный подход позволяет осуществлять комплексное моделирование производственных процессов, прогнозировать результаты технологических изменений и оптимизировать режимы работы оборудования. Кроме того, использование систем управления, основанных на технологии цифровых двойников, способствует эффективному предупреждению нештатных ситуаций и планированию технического обслуживания.

### **Заключение**

Внедрение моделей управления наукоемким производством на основе цифровых двойников является примером трансформации традиционных производственных парадигм. Исследование показывает, что интеграция цифровых двойников с озером данных обеспечивает повышение операционной эффективности при одновременном значительном улучшении возможностей принятия решений в режиме реального времени. Кроме того, благодаря этой сложной технологической базе производственные процессы демонстрируют повышенную гибкость и адаптивность.

Многоуровневая архитектура, объединяющая стратегический, тактический и операционный уровни, доказала свою эффективность в практических приложениях. Этот архитектурный подход, поддерживаемый комплексной реализацией озера данных, позволяет успешно управлять как структурированными, так и неструктурированными данными, в то время как онтологическая инженерия устанавливает важные семантические связи между компонентами системы. Эмпирические данные, в частности, полученные в результате анализа химических материалов, подтверждают теоретическую основу и демонстрируют значительное повышение операционной эффективности.

Примечательно, что протоколы поисковой оптимизации демонстрируют исключительное повышение производительности, а структурированные подходы работают в геометрической прогрессии быстрее, чем традиционные неструктурированные методологии. Это количественное улучшение подчеркивает практическую ценность предлагаемой платформы, а также ее потенциал для масштабирования в различных промышленных приложениях. Адаптивность модели предполагает ее широкое применение в различных отраслях производства, что открывает возможности для широкого внедрения в современных промышленных условиях.

Результаты исследования закладывают прочную основу для дальнейшего развития интеллектуальных производственных систем, одновременно определяя перспективные направления для будущих исследований и разработок. По мере развития технологий Индустрии 4.0 интеграция возможностей искусственного интеллекта и машинного обучения с платформами цифровых двойников открывает возможности для повышения производительности систем и оптимизации операций. Это исследование вносит вклад в накопление знаний об управлении наукоемким производством, а также дает практическую информацию для промышленного внедрения.

Синтез цифровых двойников, озер данных и онтологической инженерии создает комплексную основу для управления наукоемким производством, позволяя организациям сохранять конкурентные преимущества во все более сложных производственных условиях. По мере того как глобальное производство продолжает переходить на цифровые технологии, такие интегрированные подходы будут приобретать все большее значение для повышения операционной эффективности и устойчивого конкурентного преимущества в меняющемся промышленном ландшафте.

### Список литературы

1. Petrov A.V., Ivanov S.K. Transformation of Russian Manufacturing: Current State Analysis // *Russian Journal of Industrial Engineering*. 2023. Vol. 29, no. 3. P. 234–251.
2. Организация цифровых производств Индустрии 4.0 на основе киберфизических систем и онтологий / А.В. Гурьянов, Д.А. Заколдаев, А.В. Шукалов и др. // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18, № 2. С. 268–276. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277
3. Thompson E., Rodriguez C. Defense and Aerospace Industries in Russia: Technological Development Analysis // *International Journal of Aerospace Technology*. 2023. Vol. 43, no. 3. P. 345–362.
4. Anderson K. Regional Development Patterns in Russian High-Tech Manufacturing: A Comparative Analysis // *Journal of Industrial Development*. 2023. Vol. 34, no. 6. P. 789–806.
5. Thompson E., Rodriguez C. Hierarchical Structures in Digital Twin-Based Management Models // *International Journal of Production Systems*. 2023. Vol. 43, no. 3. P. 346–359.
6. Davidson M., Chen H. Digital Transformation in Russian Manufacturing: Progress and Barriers // *International Journal of Digital Manufacturing*. 2023. Vol. 37, no. 5. P. 567–582.
7. Brown T., Zhang W. Implementation Challenges in Russian Manufacturing: Digital Transformation Analysis // *International Journal of Production Research*. 2023. Vol. 36, no. 5. P. 445–462.
8. Anderson K. Knowledge-based manufacturing systems in Russian enterprises: Implementation and performance analysis // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. Vol. 34, no. 6. P. 789–806.
9. Martinez C., Park S. Multi-Layer Data Integration Frameworks in Advanced Manufacturing // *Manufacturing Excellence Quarterly*. 2023. Vol. 42, no. 6. P. 678–695.
10. Davidson M., Chen H. Strategic Implementation of Digital Twin-Based Management Systems // *International Journal of Production Management*. 2023. Vol. 37, no. 5. P. 567–582.
11. Brown T., Zhang W. Managing Complexity in Data Lakes: Ontological Approaches and Solutions // *International Journal of Data Science*. 2023. Vol. 36, no. 5. P. 445–462.
12. Anderson K. Ontological Frameworks in Research Data Lakes: Implementation and Analysis // *Journal of Data Management*. 2023. Vol. 34, no. 6. P. 789–806.
13. Wilson R. Innovation Centers and Technology Parks in Russia: Development Analysis // *Journal of Innovation Management*. 2023. Vol. 31, no. 4. P. 234–251.
14. Мошкин В.С., Ярушкина Н.Г. Методики построения нечетких онтологий сложных предметных областей // *Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2015): материалы V Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 19–21 февраля 2015 г.)* / под ред. В.В. Голенкова. Минск: БГУИР, 2015. С. 401–406.
15. Антонов В.В., Бармина О.В., Никулина Н.О. Поддержка принятия решений при управлении программными проектами на основе нечеткой онтологии // *Онтология проектирования*. 2020. Т. 10, № 1 (35). С. 121–140. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-121-140
16. Бурдо Г.Б., Воробьева Е.В. Онтологический подход при проектировании технологических процессов // *Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2015): материалы V междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 19–21 февраля 2015 г.)* / под ред. В.В. Голенкова. Минск: БГУИР, 2015. С. 461–464.
17. Бурдо Г.Б., Семенов Н.А., Воронцов Н.В. Подходы к созданию онтологий для автоматизированных систем в машиностроительных производствах // *Программные продукты и системы*. 2020. Т. 33, № 2. С. 304–309. DOI: 10.15827/0236-235X.130.304-309
18. Массель А.Г., Гаськова Д.А. Онтологический инжиниринг для разработки интеллектуальной системы анализа угроз и оценки рисков кибербезопасности энергетических объектов // *Онтология проектирования*. 2019. Т. 9, № 2 (32). С. 225–238.
19. Применение онтологического подхода к процессу проектирования информационной системы / А.Н. Набатов, И.Э. Веденяпин, А.Р. Мухтаров // *Труды МАИ*. 2018. № 102. С. 81–84.
20. Smith A. Implementation Strategies for Digital Twin-Based Management Models in Manufacturing // *Journal of Industrial Management*. 2023. Vol. 45, no. 4. P. 456–473.
21. Кузьмин В.Р., Загоруйко Ю.А. Применение агентно-сервисного подхода при разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений в энергетике // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. 2020. Т. 18, № 3. С. 5–18. DOI: 10.25205/1818-7900-2020-18-3-5-18

22. Johnson M, Park S. Performance Monitoring Frameworks in Integrated Manufacturing Systems // *Journal of Operations Management*. 2023. Vol. 39, no. 8. P. 890–906.
23. Information Storage and Retrieval System for a Molecular Dynamics Based Digital Twin of Materials / D. Topolsky, A. Belyakov, V. Pochinskaia et al. // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). Yekaterinburg, Russian Federation, 2022. P. 1760–1764. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017100

### References

1. Petrov A.V., Ivanov S.K. Transformation of Russian Manufacturing: Current State Analysis. *Russian Journal of Industrial Engineering*. 2023;29(3):234–251.
2. Gurjanov A.V., Zakoldaev D.A., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Kostishin M.O. Industry 4.0 digital production organization based on cyber and physical systems and ontologies. *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics = Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2018;18(2):268-276. (In Russ.) DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277
3. Thompson E., Rodriguez C. Defense and Aerospace Industries in Russia: Technological Development Analysis. *International Journal of Aerospace Technology*. 2023;43(3):345–362.
4. Anderson K. Regional Development Patterns in Russian High-Tech Manufacturing: A Comparative Analysis. *Journal of Industrial Development*. 2023;34(6):789–806.
5. Thompson E., Rodriguez C. Hierarchical Structures in Digital Twin-Based Management Models. *International Journal of Production Systems*. 2023;43(3):346–359.
6. Davidson M., Chen H. Digital Transformation in Russian Manufacturing: Progress and Barriers. *International Journal of Digital Manufacturing*. 2023;37(5):567–582.
7. Brown T., Zhang W. Implementation Challenges in Russian Manufacturing: Digital Transformation Analysis. *International Journal of Production Research*. 2023;36(5):445–462.
8. Anderson K. Knowledge-based manufacturing systems in Russian enterprises: Implementation and performance analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023;34(6):789–806.
9. Martinez C., Park S. Multi-Layer Data Integration Frameworks in Advanced Manufacturing. *Manufacturing Excellence Quarterly*. 2023;42(6):678–695.
10. Davidson M., Chen H. Strategic Implementation of Digital Twin-Based Management Systems. *International Journal of Production Management*. 2023;37(5):567–582.
11. Brown T., Zhang W. Managing Complexity in Data Lakes: Ontological Approaches and Solutions. *International Journal of Data Science*. 2023;36(5):445–462.
12. Anderson K. Ontological Frameworks in Research Data Lakes: Implementation and Analysis. *Journal of Data Management*. 2023;34(6):789–806.
13. Wilson R. Innovation Centers and Technology Parks in Russia: Development Analysis. *Journal of Innovation Management*. 2023;31(4):234–251.
14. Moshkin V.S., Yarushkina N.G. [Methods for Constructing Fuzzy Ontologies of Complex Subject Areas]. In: *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems Design (OSTIS-2015): Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference*. Minsk: BSUIR; 2015. P. 401–406. (In Russ.)
15. Antonov V.V., Barmina O.V., Nikulina N.O. Decision-making support in software project management based on fuzzy ontology. *Ontology of Designing*. 2020;10(1(35)):121–140. (In Russ.) DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-121-140
16. Burdo G.B., Vorobyeva E.V. [Ontological Approach in Technological Process Design]. In: *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems Design (OSTIS-2015): Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference*. Minsk: BSUIR; 2015. P. 461–464. (In Russ.)
17. Burdo G.B., Semenov N.A., Vorontsov N.V. Approaches to creating ontologies for automated systems in machine-building industries. *Software & Systems*. 2020;33(2):304–309. (In Russ.) DOI: 10.15827/0236-235X.130.304-309
18. Massel A.G., Gaskova D.A. Ontological engineering for the development of the intelligent system for threats analysis and risk assessment of cybersecurity in energy facilities. *Ontology of Designing*. 2019;9(2(32)):225–238. (In Russ.)
19. Nabatov A.N., Vedenyapin I.E., Mukhtarov A.R. Applying ontology approach to information system design. *Trudy MAI*. 2018;(102):81–84. (In Russ.)

20. Smith A. Implementation Strategies for Digital Twin-Based Management Models in Manufacturing. *Journal of Industrial Management*. 2023;45(4):456–473.

21. Kuzmin V.R., Zagorulko Yu.A. Usage of the Agent-Service Approach for the Development of Intelligent Decision Support Systems in the Energy Sector. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2020;18(3):5–18. (In Russ.) DOI: 10.25205/1818-7900-2020-18-3-5-18

22. Johnson M., Park S. Performance Monitoring Frameworks in Integrated Manufacturing Systems. *Journal of Operations Management*. 2023;39(8):890–906.

23. Topolsky D., Belyakov A., Pochinskaia V., Topolskaya I., Yumagulov N., Fedorov D. Information Storage and Retrieval System for a Molecular Dynamics Based Digital Twin of Materials. In: *2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*. Yekaterinburg, Russian Federation, 2022. P. 1760–1764. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017100

### **Информация об авторах**

**Логиновский Олег Витальевич**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

**Белякова Вероника Алексеевна**, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; beliakovava@susu.ru.

### **Information about the authors**

**Oleg V. Loginovskiy**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

**Veronica A. Beliakova**, Postgraduate student of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; beliakovava@susu.ru.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

**Статья поступила в редакцию 14.11.2024**

**The article was submitted 14.11.2024**

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАДАЧА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКОЛЕНИЙ НОВОЙ ТЕХНИКИ

**С.А. Баркалов**, [sbarkalov@nm.ru](mailto:sbarkalov@nm.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

**П.Н. Курочка**, [kpn55@rambler.ru](mailto:kpn55@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4945-9552>

**Е.А. Серебрякова**, [sea-parish@mail.ru](mailto:sea-parish@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5129-246X>

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия*

**Аннотация. Цель исследования.** Отмечается, что приоритетным направлением развития экономики является инновационное направление, а это предполагает организацию работ по формированию поколений новой техники. Данное обстоятельство вызвано рядом факторов. Показано, что в ходе решения этих задач наиболее перспективными являются способы многокритериального описания проблемы. Отсюда возникает необходимость осуществления редукции методов многокритериальной оптимизации применительно к задачам формирования новых поколений техники. Отмечается сложность процесса разработки инновационных решений, обеспечивающих учет технологических, экономических и экологических факторов. Приведена формальная постановка задачи выбора технологий, обеспечивающей максимизацию выручки в рамках выделенного бюджета при минимальном количестве отбираемых решений. **Материалы и методы.** Рассмотрены методы решения многокритериальных задач, включая классические метод ветвей и границ, динамическое программирование, жадные и эвристические алгоритмы, анализ иерархий, метод уступок, эволюционные алгоритмы и метод Парето. Особое внимание уделено формированию Парето-оптимального множества, позволяющего сократить число альтернатив за счет исключения неэффективных решений. Демонстрируется, как дискретизация интервала затрат и решение серии задач целочисленного программирования генерируют точки на кривой Парето. **Результаты.** Практическая значимость исследования объясняется потребностями в ходе управления строительными проектами, где оптимизация сокращает издержки, и антимонопольного регулирования через анализ графов рыночных взаимодействий. В последнее время отмечается широкое распространение PLM-систем, искусственного интеллекта в повышении эффективности подобных разработок. Не должна при этом оставаться в стороне и проблема создания экологически чистых технологий. **Заключение.** Подчеркивается необходимость интеграции математических моделей с современными инструментами управления для минимизации субъективности в принятии решений. Перспективным направлением названо применение многокритериальных моделей, методов машинного обучения и адаптация подходов к немарковским процессам. Показано, каким образом возможен переход от многокритериальной задачи к последовательности задач традиционной оптимизации. Подчеркивается, что в этом случае строится Парето-оптимальное множество решений рассматриваемой задачи.

**Ключевые слова:** многокритериальная оптимизация, Парето-оптимальность, управление жизненным циклом, целочисленное программирование, инновационные технологии

**Для цитирования:** Баркалов С.А., Курочка П.Н., Серебрякова Е.А. Многокритериальная задача формирования поколений новой техники // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 107–119. DOI: 10.14529/ctcr250210

## MULTICRITERIA TASK OF FORMING GENERATIONS OF NEW TECHNOLOGY

**S.A. Barkalov**, [sbarkalov@nm.ru](mailto:sbarkalov@nm.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>  
**P.N. Kurochka**, [kpn55@rambler.ru](mailto:kpn55@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4945-9552>  
**E.A. Serebryakova**, [sea-parish@mail.ru](mailto:sea-parish@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5129-246X>  
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract. The purpose of the study.** It is noted that the priority direction of economic development is innovation, and this implies the organization of work on the formation of generations of new technology. This circumstance is caused by a number of factors. It is shown that in the course of solving these problems, the most promising methods are the multi-criteria description of the problem. Hence, there is a need to reduce the methods of multi-criteria optimization in relation to the tasks formation of new generations of technology. The complexity of the process of developing innovative solutions that ensure accounting is noted technological, economic and environmental factors. A formal statement of the problem of choosing technologies that maximize revenue within the allocated budget with a minimum number of selected solutions is given. **Materials and methods.** Methods for solving multi-criteria problems are considered, including the classical method of branches and boundaries, dynamic programming, greedy and heuristic algorithms, hierarchy analysis, the assignment method, evolutionary algorithms and the Pareto method. Special attention is paid to the formation of a Pareto-optimal set, which makes it possible to reduce the number of alternatives by eliminating inefficient solutions. It demonstrates how discretization of the cost interval and solving a series of integer programming problems generate points on the Pareto curve. **Results.** The practical significance of the research is explained by the needs in the course of construction project management, where optimization reduces costs, and antimonopoly regulation through the analysis of graphs of market interactions. Recently, there has been widespread use of PLM systems and artificial intelligence in improving the efficiency of such developments. At the same time, the problem of creating environmentally friendly technologies should not be left out. **Conclusion.** The need to integrate mathematical models with modern management tools is emphasized in order to minimize subjectivity in decision-making. The use of multi-criteria models, machine learning methods, and adaptation of approaches to non-Markov processes is considered a promising area. It is shown how the transition from a multi-criteria task to a sequence of traditional optimization tasks is possible. It is emphasized that in this case, a Pareto-optimal set of solutions to the problem under consideration is constructed.

**Keywords:** multicriteria optimization, Pareto optimality, life cycle management, integer programming, innovative technologies

**For citation:** Barkalov S.A., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Multicriteria task of forming generations of new technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2025;25(2):107–119. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250210

### Введение

Процесс развития новой техники является одним из приоритетных направлений развития компании. Именно поэтому создание поколений новой техники предопределяет достижение определенного прогресса в области конструктивных и технологических решений, на базе которых и осуществляется разработка. Применение новых решений в конструктивной и технологической сфере предполагает получение образцов новой техники, обладающих новыми функциональными свойствами. Таким образом, создание новых функциональных свойств у разрабатываемого объекта предполагает применение новых конструктивно-технологических решений [1, 2].

Формирование поколений новой техники – это процесс разработки и внедрения инновационных технологий, продуктов и систем, которые представляют собой значительный шаг вперед по сравнению с существующими решениями. Этот процесс включает в себя исследования, проектирование, разработку, тестирование и внедрение новых технологий в различных отраслях, таких как производство, энергетика, транспорт, связь и т. д.

Необходимость формирования поколений новой техники обусловлена рядом факторов [3, 4]:

**Технологическое развитие.** С развитием науки и техники появляются новые возможности для создания более эффективных и инновационных решений, на основе которых возможна разработка образцов новой техники, позволяющих повысить производительность труда и уровень жизни людей.

**Конкурентоспособность.** В современных экономических условиях функционирование любого предприятия предполагает сохранение и дальнейшее расширение собственного сектора рынка продукции и услуг, а также выход на новые направления производственной деятельности. Именно этот фактор позволяет предприятию уцелеть в жестокой конкурентной борьбе. Результатом такой борьбы является появление новых инновационных решений, что позволяет в более полной мере удовлетворять потребности контрагентов и, как результат, способствует увеличению объемов выручки. Успешное внедрение инновационных разработок предполагает использование концепции формирования поколений новой техники.

**Экономический рост.** Процесс генерирования поколений новой техники в конечном итоге приводит к ускоренному экономическому развитию, сопровождающемуся появлением новых рабочих мест. Это является триггером для дальнейшего инвестирования с целью мотивации процессов инновационного развития, что в принципе может способствовать росту экономического потенциала страны в целом.

**Экономия ресурсов.** Процедура построения модельного ряда поколений новой техники может выявить в ходе анализа тупиковые или неперспективные направления развития технической политики предприятия. Естественно, это способствует сокращению затрат на развитие неэффективных или невостребованных на рынке инновационных решений, что позволяет сконцентрировать ресурсы предприятия на наиболее значимых направлениях технического развития. Таким образом, процесс формирования поколений новой техники может рассматриваться как один из способов оптимизации использования ресурсов.

**Повышение качества продукции.** Технология формирования массива перспективной техники позволяет осуществить более тщательное исследование надежности отбираемых вариантов за счет сокращения их численности, что благоприятствует производству более качественной и конкурентоспособной продукции.

**Сокращение времени разработки.** Методика построения кластера нового образца техники позволяет на основе метода аналогий существенно сэкономить время на разработку и подготовку к производству нового вида продукции за счет того, что отдельные этапы реализации будут повторяться.

**Удовлетворение потребностей рынка.** Используя опыт эксплуатации более ранних образцов изделия, получили возможность в более полной мере учесть пожелания покупателей, что позволит предприятию увеличить объем своей выручки.

**Снижение рисков.** Технология создания модельного ряда образцов новой техники позволяет уменьшить угрозу возникновения деструктивных последствий от принимаемого решения за счет возможности более тщательного анализа вариантов принимаемого управленческого решения.

Рассматриваемая технология построения ряда вариантов инновационного развития позволяет не только воплотить в повседневную технологическую практику предприятия перечисленные выше локальные компоненты, определяющие позитивный вектор развития компании, но и осуществить некоторое количество стратегически важных факторов, таких как [5, 6]:

– **улучшение качества жизни.** Инновационные решения, применяемые при создании новых видов продукции, способствуют повышению качества жизни населения за счет предоставления им более эффективных технологических решений в социально-экономических областях, например, образование, транспорт, здравоохранение, торговля;

– **вклад в решение глобальных проблем.** Деятельность любого, даже самого малого предприятия не осуществляется изолированно, а происходит в рамках глобальной системы, для которой свойственны масштабные проблемы, которые можно решить только при совместном подходе. В качестве примера таких проблем можно рассмотреть охрану окружающей среды, энергетический кризис, дефицит пресной воды и т. п. Безусловно, подход к решению этих проблем лежит только в сфере инновационного развития предприятий, опирающихся на концепцию формирования поколения новой техники [7, 8].

Следовательно, технология генерации множества перспективных поколений новой техники представляет собой ключевой элемент развития общества, экономического роста и научно-технического прогресса [6, 8]. Данный механизм стимулирует создание прорывных решений, способствующих улучшению условий жизни населения, укреплению позиций компаний на рынке и преодолению масштабных мировых вызовов.

Разработка инновационных образцов техники нуждается в достаточно серьезном ресурсном обеспечении, требующем значительных инвестиций: материальных, человеческих, интеллектуальных и финансовых. Данное обстоятельство объясняет эволюционный характер распространения новых технологий – перспективные концепции со временем воплощаются в новых модификациях, расширяя линейку продуктов [8, 9].

В этом контексте ключевым элементом становится прототип – функциональная модель будущего изделия, позволяющая имитировать его работу ещё до запуска в серийное производство [5, 10, 11].

Использование прототипов на этапе НИОКР критически важно: они помогают выявить и скорректировать конструктивные недочёты на стадии проектирования. Среди современных методов их создания выделяют быструю разработку, аддитивное производство (3D-печать) и цифровое моделирование [6, 12]. Эти технологии минимизируют сроки разработки, снижают расходы и повышают качество итогового продукта за счёт оптимизации проектных решений.

Ключевым условием при создании современных технических решений выступает объединение знаний из различных инженерных областей: механики, электротехники, программной инженерии и системного проектирования. Для эффективной совместной работы специалистов из этих сфер необходимы интегрированные системы управления жизненным циклом продукции (PLM) и слаженное взаимодействие между командами и подразделениями.

В процессе разработки особый акцент делается на достижение высоких показателей качества и долговечности изделий. Этого добиваются за счёт многоуровневой системы проверок, охватывающей лабораторные тесты, имитацию рабочих условий и испытания в реальной среде. В рамках этих процессов применяются стандартизированные методы, такие как FMEA (прогнозирование и предотвращение потенциальных дефектов), а также тестирование HIL (аппаратно-программное моделирование) и SIL (проверка алгоритмов в виртуальной среде) [10, 13, 14].

Ориентиром в этом процессе служит соответствие общепринятым международным и национальным стандартам типа ISO, IEC и ГОСТ, что дает возможность гарантировать безаварийное функционирование создаваемых изделий и предусмотреть их сопряженность с уже существующими техническими образцами.

При этом в ходе работы появляются решения, требующие защиты авторских прав, которая достигается за счет механизмов патентования, позволяющих законодательно закрепить свое авторство, что позволяет рассчитывать на повышение конкурентоспособности компании. Это обстоятельство вынуждает предприятия на стадии предварительной разработки инновационной идеи проводить тщательный патентный поиск, что дает возможность снизить риск штрафных санкций за нарушение авторских прав третьих лиц.

Следовательно, организация работ по созданию новых образцов техники представляет собой достаточно сложную и многоплановую проблему, требующую привлечения значительного количества ресурсов как материальных, так и интеллектуальных. Это позволяет выводить на рынок инновационную продукцию, отвечающую самым продвинутым требованиям потребителей.

В процессе разработки образцов новой техники основной проблемой является выбор материально-технологической составляющей проекта, то есть какие материалы и технологии будут использованы. От этого зависят свойства нового изделия и технологичность его производства, то есть насколько быстро можно построить новый технологический процесс, причем желательно, чтобы он не сильно отличался от уже используемых в компании.

Единых рекомендаций и алгоритмов для решения подобной задачи не существует: многое опирается на здравый смысл и предыдущий производственный опыт лица, принимающего решения.

Но в ходе реализации инновационного проекта приходится принимать не только технические, но также и управленческие решения, направленные на грамотную организацию работ по реализации задуманного. И эта деятельность должна документально оформить все этапы существования разрабатываемого образца. Это приводит к пониманию жизненного цикла продукции,

охватывающего все этапы работ начиная от проектирования до вывода из эксплуатации и последующей утилизации.

Современные требования к процессам проектирования и производства настоятельно рекомендуют применение автоматизированных систем на базе достижений искусственного интеллекта, использующего процессы обработки больших объемов данных. Такие подходы позволяют осуществлять непрерывное сканирование происходящих процессов в реальном режиме времени, что обеспечивает устойчивость управляемыми процессами.

Сложная ситуация с урбанизацией окружающей среды требует соответствующего внимания еще на стадии проектирования инноваций. Компании стремятся минимизировать воздействие своей продукции на окружающую среду через применение экологически чистых материалов, технологий энергосбережения и утилизации отходов. В этом контексте важны исследования и разработки в области возобновляемых источников энергии, электромобилей и других экологически чистых технологий.

Таким образом, разработка новой техники требует комплексного подхода, включающего передовые методы проектирования, современные материалы и технологии производства, эффективное управление жизненным циклом продукции и учет экологических аспектов. Интеграция этих элементов позволяет создавать высокотехнологичные и конкурентоспособные изделия, отвечающие современным требованиям рынка и нормативным стандартам.

### 1. Математическая постановка задачи

Вполне понятно, что всякий проект реализуется в рамках определенного бюджета, и, как правило, финансовых ресурсов не хватает, поэтому возникает задача достижения максимальной отдачи от проводимых мероприятий. То есть возникает задача получения максимальной выручки от вложенных средств.

Для формализованной постановки задачи введем двоичную переменную  $x_i$ , принимающую значение, равное 1, в том случае, когда  $i$ -я технология отобрана для воспроизводства, и 0 – в противном случае; доход, получаемый от реализации  $i$ -й технологии, обозначим через  $b_i$ , а затраты на ее внедрение –  $C_i$ . Для того чтобы не получить при решении тривиальный результат – ничего не выбирать, то есть нулевое решение, – задачу необходимо дополнить ограничением на число отбираемых технологий. Обозначим наименьшее число отбираемых технологий через  $y_j$ . Тогда в этом случае формальная постановка задачи о максимизации выручки от внедрения новых технологий может быть записана в следующей форме [1, 15]:

$$\sum_{i=1}^N b_i x_i \rightarrow \max \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^N x_i \geq y_j, \quad j = \overline{1, M}, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N C_i x_i \leq R. \quad (3)$$

Итак, у нас есть задача максимизации выручки от внедрения новых технологий, сформулированная с использованием двоичных переменных. Нам нужно выбрать, какие технологии внедрять, чтобы максимизировать суммарный доход, учитывая ограничения на минимальное количество технологий и бюджет.

Сначала посмотрим на целевую функцию (1). Это сумма произведений  $b_i$  на  $x_i$ , то есть суммарный доход от выбранных технологий. Нам нужно максимизировать эту сумму. Ограничение (2) говорит, что сумма  $x_i$  должна быть не меньше  $y_j$  для каждого  $j$  от 1 до  $M$ . Но тут, возможно, опечатка, потому что  $y_j$  обычно обозначают как минимальное количество технологий, а  $M$  – количество ограничений. Может быть, имелось в виду, что сумма  $x_i \geq y_{\min}$ , где  $y_{\min}$  – минимальное количество технологий, которые нужно выбрать. Тогда, возможно, здесь ошибка в индексах.

Ограничение (3) – суммарные затраты на выбранные технологии не должны превышать бюджет  $R$ . То есть сумма  $C_i x_i \leq R$ .

### 2. Методы решения

Полученная задача относится к классу задач целочисленного программирования с двоичными переменными. Поскольку переменные  $x_i$  могут быть только 0 или 1, это задача бинарной оптимизации.

Методы решения таких задач включают [2, 15]:

1) **метод ветвей и границ** – классический подход для задач целочисленного программирования. Он систематически перебирает возможные значения переменных, отсекая неперспективные ветви на основе оценок;

2) **жадные алгоритмы** – можно попробовать сортировать технологии по соотношению доход/затраты и выбирать лучшие, пока не достигнем ограничений. Но это может не дать оптимального решения;

3) **динамическое программирование** – если бюджет  $R$  не слишком большой, можно использовать метод динамического программирования для задач рюкзака. Здесь задача похожа на задачу о рюкзаке, где нужно выбрать предметы (технологии) с максимальной суммарной ценностью (доходом), не превышая вместимость рюкзака (бюджет  $R$ ), и с учетом минимального количества предметов;

4) **эвристические методы** – генетические алгоритмы, имитация отжига и т. д., особенно если задача большого масштаба.

Проверим, какие ограничения у нас есть. Ограничение на минимальное количество технологий (сумма  $x_i \geq y_{\min}$ ) и ограничение на бюджет. Значит, задача имеет два ограничения: суммарные затраты меньше или равны размеру выделенных средств и количество выбранных технологий должно равняться или превышать некоторое наперед заданное число  $y_{\min}$ .

Для формального решения лучше всего подойдет метод ветвей и границ, так как он дает точное решение. Однако при больших  $N$  это может быть вычислительно сложно.

Также можно рассмотреть задачу как модификацию задачи о рюкзаке с дополнительным ограничением на минимальное количество предметов. В классической задаче о рюкзаке мы максимизируем ценность при ограничении на вес. Здесь добавляется еще одно ограничение на минимальное количество. Такие задачи могут решаться модификациями динамического программирования или ветвей и границ.

Итак, формулировка задачи:

максимизировать

$$\sum_{i=1}^N b_i x_i \rightarrow \max$$

при условиях:

$$\sum_{i=1}^N x_i \geq y_j, \quad j = \overline{1, M},$$

$$\sum_{i=1}^N C_i x_i \leq R,$$

$$x_i \in \{0, 1\}.$$

Для решения такой задачи можно использовать следующие шаги:

1) проверка выполнимости: убедиться, что существует хотя бы  $y_{\min}$  технологий, сумма затрат на которые не превышает  $R$ . Если нет, задача не имеет решения;

2) сокращение пространства поиска: отфильтровать технологии, которые слишком дорогие ( $C_i > R$ ), так как их нельзя выбрать;

3) применение алгоритма ветвей и границ: построить дерево решений, на каждом шаге фиксируя значение  $x_i$  (0 или 1) и вычисляя верхние оценки для оставшихся переменных, чтобы отсеять неперспективные ветви;

4) использование релаксации: решить задачу без ограничения целочисленности (допуская  $0 \leq x_i \leq 1$ ), а затем округлить решение, но это не гарантирует оптимальность.

5) применение динамического программирования: построить таблицу, содержащую величину максимального дохода при выборе  $k$  технологий, затратах  $c$  и  $m$  выбранных технологий. Однако это может быть сложно из-за трехмерной таблицы.

Учитывая, что ограничение на минимальное количество технологий может быть учтено добавлением его в условия, вероятно, наиболее подходящим методом будет метод ветвей и границ с учетом обоих ограничений.

Также можно попробовать преобразовать задачу, введя штраф за невыполнение минимального количества, но это уже эвристический подход.

В итоге, рекомендуем использовать метод ветвей и границ или специализированные оптимизационные пакеты. Если же речь идет о ручном решении для небольшого числа переменных, можно перебрать все возможные комбинации, удовлетворяющие ограничениям, и выбрать наилучшую.

Для решения задачи максимизации выручки от внедрения технологий с учетом ограничений на бюджет и минимальное количество технологий используется **метод ветвей и границ**. Эта задача относится к классу задач бинарного целочисленного программирования. Формальная постановка:

целевая функция

$$\sum_{i=1}^N b_i x_i \rightarrow \max$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^N x_i \geq y_j, j = \overline{1, M},$$

$$\sum_{i=1}^N C_i x_i \leq R,$$

$$x_i \in \{0, 1\}.$$

**Алгоритм решения:**

**1. Проверка выполнимости:**

• убедиться, что существует комбинация из хотя бы  $y_{\min}$  технологий, суммарные затраты на которые не превышают  $R$ . Если нет – задача не имеет решения.

**2. Фильтрация технологий:**

• исключить технологии с  $C_i > R$ , так как их внедрение невозможно.

**3. Метод ветвей и границ:**

• построение дерева решений, где каждый узел соответствует выбору  $x_i = 0$  или  $x_i = 1$ ;  
• на каждом шаге вычисляется верхняя оценка возможной выручки (например, через релаксацию задачи без целочисленности);  
• ветви, где оценка ниже текущего лучшего решения, отсекаются.

**4. Динамическое программирование (альтернатива):**

• для небольших  $R$  и  $y_{\min}$  можно использовать модификацию задачи о рюкзаке, учитывающую ограничение на минимальное количество:

$dp_{m,c}$  = максимальный доход при выборе  $m$  технологий и затратах.

Обновление таблицы происходит по правилу

$$dp_{m+1,c+C_i} = \max(dp_{m+1,c+C_i}, dp_{m,c} + b_i).$$

**1. Интерпретация**

Формула обновляет состояние  $dp_{m+1,c+C_i}$  (для  $m+1$  элементов и ограничения  $c+C_i$ ) следующим образом:

• берётся максимум между текущим значением  $dp_{m+1,c+C_i}$  и новым вариантом:  $dp_{m,c} + b_i$ ;  
• (предыдущее состояние  $dp_{m,c}$  плюс ценность  $b_i$  текущего элемента).

**2. Контекст задачи**

Это типичный шаг для задач, где требуется выбрать подмножество элементов с ограничением на суммарный «вес» ( $C_i$ ) и максимизацией суммарной «ценности» ( $b_i$ ). Примеры:

• классическая задача о рюкзаке;  
• оптимизация бюджета (например, выбор проектов с ограничением на затраты).

**3. Нотация**

• Индексы  $m$  и  $c$  обозначают размер подзадачи;  
•  $C_i$  и  $b_i$  – параметры  $i$ -го элемента;  
•  $\max$  – выбор оптимального значения.

**Пример для задачи о рюкзаке:**

• **Дано:** рюкзак вместимостью  $W$ , элементы с весами  $C_i$  и ценностями  $b_i$ .

• **Цель:** найти подмножество элементов с суммарным весом  $\leq W$ , максимизирующее суммарную ценность.

• **Рекуррентное соотношение:**

$$dp_{i,w} = \max(dp_{i-1,w}, dp_{i-1,w-C_i} + b_i).$$

Здесь  $i$  – номер элемента;  $w$  – текущая вместимость.

• Если в формуле используется  $m+1$ , это может означать, что элементы нумеруются с 0, а  $m$  – текущий элемент.

• В программировании такие формулы реализуются через двумерные массивы или оптимизированные структуры данных.

Оптимальное решение достигается методом ветвей и границ. Для небольших задач подходит полный перебор или динамическое программирование [3, 16].

**Итог:**

Оптимальное решение достигается методом ветвей и границ или с использованием специализированного программного обеспечения. Для небольших задач подходит полный перебор или динамическое программирование.

Возможно применение и эвристических алгоритмов, позволяющих получать решение если и не точно оптимальные, то, по крайней мере, близкие к оптимальным.

Для этого необходимо по исходным данным вычислить эффективность реализации каждого из возможных вариантов [16]:

$$\varepsilon_i = \frac{b_i}{c_i}.$$

Варианты отбираются по мере возрастания параметра эффективности  $\varepsilon_i$ , при этом необходимо вести подсчет отобранных инноваций, так как конкретное изделие может реализовывать и несколько технологий. Набрал требуемое количество технологий  $m$ , необходимо проверить, укладывается ли это решение в ограничения по бюджету, если да, то решение получено, если же нет, то необходимо продолжить.

Для решения задач подобного типа возможно применение метода сетевого программирования. Основой для этого является следующее утверждение:

**Утверждение 1.** Исходный граф задачи формирования поколений новой техники может быть представлен в дихотомическом виде.

Использование постановок задач с учетом многокритериальности позволяет существенно улучшить адекватность используемых моделей, приблизив их к реальной производственной действительности, так как принимаемые организационно-технологические решения описываются целым пулом критериев, из которых достаточно трудно выделить самый существенный. Как правило, хотелось бы количественно оценить влияние каждого из них. Это и служит практической основой для применения задач многокритериальной оптимизации.

Но здесь надо иметь в виду, что в результате решения таких задач получается решение, которое будет иметь практическую ценность только на данном конкретном этапе производственной деятельности, то есть для сложившейся ситуации в конкретный промежуток времени и для конкретного лица, принимающего решения.

Применение задач многокритериальной оптимизации позволяет повысить **точность и обоснованность принимаемых управленческих решений**. Поскольку подобный подход рассматривает изучаемое явление с нескольких сторон, это позволяет увидеть связи и закономерности, скрытые при традиционном подходе средствами математического программирования. Это дает возможность построить на предприятии логичный и эффективный процесс принятия управленческих решений, исключающий волюнтаризм и субъективизм: принимаемые решения имеют твердое обоснование, дающие основу для прозрачности, что повышает их деловую ценность.

Все это является основой для установления конструктивных и долгосрочных связей с контрагентами предприятия и служит базой для формирования компромиссов при решении спорных вопросов.

### 3. Многокритериальная задача оптимизации

Рассмотренный выше алгоритм решения задачи о максимизации выручки в рамках заданного бюджета может быть положен в основу решения многокритериальной задачи оптимизации. По своему содержанию рассматриваемая задача может быть распространена на класс многокритериальных задач оптимизации, когда необходимо максимизировать выручку, получаемую от внедрения новых технологий и при этом минимизировать бюджет. Используя особенности постановки задачи, ее решение можно свести к последовательному решению серии задач, аналогичных рассмотренной выше.

В этом случае приходим к следующей формальной постановке многокритериальной задачи оптимизации:

$$\sum_{i=1}^N b_i x_i \rightarrow \max, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N C_i x_i \rightarrow \min, \quad (5)$$

где бюджет проекта  $R$  изменяется в пределах  $R^{\min} \leq R \leq R^{\max}$ , при этом  $R^{\min}$  и  $R^{\max}$  – нижнее и верхнее ограничения на размер бюджетных средств.

Кроме того, должны выполняться ограничения на количество отбираемых технологий

$$\sum_{i=1}^N x_i \geq y_j, \quad j = \overline{1, M}. \quad (6)$$

Решение многокритериальной задачи оптимизации – это процесс поиска решения, удовлетворяющего параллельно нескольким критериям сразу. В отличие от однокритериальных задач, где цель состоит в максимизации или минимизации одного параметра, многокритериальные задачи требуют учёта нескольких параметров одновременно.

Кратко остановимся на обзоре фундаментальных методов решения многокритериальных задач [1, 2, 4]:

**Метод анализа иерархий.** По исходным данным строится иерархическая структура задачи, основанная на критериях оценки для каждой альтернативы. При этом формируется вес каждого критерия, характеризующий его важность в рамках решаемой задачи. Это дает возможность выбрать наилучшее решение из всех возможных.

**Метод главного критерия.** Один из критериев, наиболее значимый с точки зрения исследователя, выбирается в качестве главного (основного), а все остальные критерии принимаются в виде ограничений. Таким образом, задача сводится к традиционной задаче условной оптимизации. В качестве решения принимается значение определяющего критерия, доставляющего экстремум единственной целевой функции при выполнении остальных требований, задаваемых в форме ограничений.

**Метод уступок.** Выстраивают ранжированный по важности ряд исходных критериев задачи. Решение разбивается на последовательность шагов, на каждом из которых допускается ухудшение значений текущего с целью улучшения значений других критериев. Критерием остановки итераций является получение приемлемых вариантов решения.

**Метод Парето.** Метод заключается в том, что требуется найти Парето-оптимальное множество возможных решений. Основной характеристикой элементов такого множества является невозможность улучшения решения по одному из критериев, не ухудшив его по другим критериям. Нахождение такого множества сильно сокращает число потенциально пригодных решений, что дает возможность лицу, принимающему решение, выбрать наиболее эффективный вариант для сложившихся условий.

**Методы эволюционного поиска.** Основаны на использовании генетических алгоритмов.

**Методы программирования.** Традиционные методы, в основе которых лежат достижения математического программирования.

**Интерактивные методы.** В этом случае предполагается участие человека в процедуре формирования решения рассматриваемой задачи. Участие человека заключается в задании приоритетов, определении последовательности критериев, характеризующих изучаемую предметную область и выборе окончательного решения задачи.

Вопрос о выборе конкретного метода будет зависеть от специфики решаемой задачи, набора используемых данных и точности решения, которую необходимо обеспечить.

Естественно, наиболее часто при решении многокритериальных задач оптимизации исследователь сталкивается с необходимостью получения Парето-оптимального множества решений. Для этой цели возможно использование следующего алгоритма.

1. Задаться набором критериев, которые будут определять эффективность функционирования изучаемой социально-экономической системы.

2. Изучить поведение исследуемой системы с целью получения сведений о значениях отобранных критериев эффективности, то есть собрать статистику.

3. На основе собранных данных построить график или диаграмму. Возможно, если критериев много, то придется построить несколько графиков.

4. На этом графике или графиках необходимо найти точки, входящие в Парето-оптимальное множество решений. Для этой цели используют свойства Парето-оптимального множества: ни один параметр не может быть улучшен без ухудшения значений других.

5. Из полученного множества Парето-оптимальных решений лицо, принимающее решение, выбирает то, которое, на его взгляд, будет наиболее целесообразным в сложившихся условиях.

Следует отметить, что, несмотря на простоту изложения алгоритма, задача нахождения Парето-оптимального множества решений является достаточно сложной и трудоемкой, но позволяет найти приемлемое, в конкретных условиях производственной действительности, решение [5, 7, 17].

В целях решения данной задачи может быть использовано следующее утверждение 2:

**Утверждение 2.** Итоговая таблица метода дихотомического программирования содержит множество Парето-оптимальных решений исходной задачи.

Полученная задача относится к классу задач многокритериальной оптимизации, основным методом решения которых являются методы, связанные с получением интегральной оценки, а затем приведение исходной задачи к одной из стандартных задач математического программирования.

Но получение комплексной оценки всегда сопряжено с большой степенью субъективности в построении редукции исходной задачи к задаче традиционного математического программирования.

Поэтому для лица, принимающего решения, предпочтительнее было бы получение некоторого достаточно ограниченного набора возможных конкурентоспособных решений, из которых затем и можно будет выбирать единственное решение, руководствуясь конкретной ситуацией. В данном случае речь идет о получении множества решений, оптимальных по Парето.

Рассматриваемая задача позволяет получить множество Парето с помощью достаточно простого алгоритма.

Очевидно, что минимальные затраты будут соответствовать случаю, когда на всех объектах работы выполняются по самому дешевому варианту. Понятно, что этому варианту будет соответствовать и максимальное значение продолжительности, то есть мы получили точку с координатами  $(S_{\min}; T_{\max})$ .

В том случае, если допустить, что все рассматриваемые объекты будут содержаться по самому дорогому варианту, это будет соответствовать и минимальному значению продолжительности, то есть в данном случае будет найдена точка с координатами  $(S_{\max}; T_{\min})$ .

Это дает возможность найти координаты идеальной точки  $(S_{\min}; T_{\min})$  и «антиидеальной»  $(S_{\max}; T_{\max})$ . В этом случае для нахождения множества Парето-оптимальных решений необходимо решить серию задач целочисленного программирования вида:

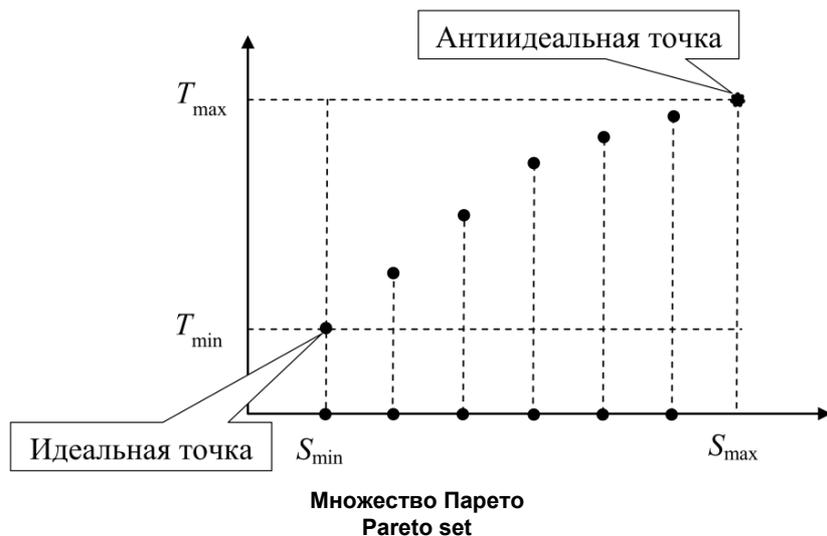
$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \tau_{ij} x_{ij} &\rightarrow \max, \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij} x_{ij} &\leq R_k, k \in [S_{\min}; S_{\max}], \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} &= 1, i = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Осуществляя дискретизацию интервала  $[S_{\min}; S_{\max}]$  с приемлемой для исходной задачи точностью, получаем серию задач. Решение каждой такой задачи дает одну точку множества Парето (см. рисунок).

Имея ограниченное множество решений, лицо, принимающее решение, ориентируясь на конкретную ситуацию, может принять обоснованное решение, выбрав из паретовского множества то, которое будет отвечать сложившимся внешним условиям.

Естественно, возникает вопрос о получении единственного решения. Это возможно на основе одного из принципов оптимальности, при этом необходимо задаться значимостью каждого критерия. Как известно, значимость критерия определяется весовым коэффициентом, определяемым экспертным путем.

Поэтому на этом этапе в решение задачи вносится существенный элемент субъективизма. Рассмотрим применение различных принципов оптимальности при условии равнозначности используемых критериев, то есть будем считать, что в рассматриваемых условиях параметры затрат и долговечности по значимости равны.



Наиболее наглядными являются принципы идеальной и «антиидеальной» точек. Идея этих принципов достаточно очевидна: находится наилучшая (наихудшая) точка, которая соответствует экстремальным значениям исследуемых критериев, в нашем случае это затраты и продолжительность, а затем вычисляются расстояния от каждой точки паретовского множества до идеальной или «антиидеальной» точек.

Оптимальным считается то решение, которое имеет минимальное (а в случае «антиидеальной» точки максимальное) расстояние.

### Заключение

Рассмотрена задача максимизации выручки от внедрения новых технологий и многокритериальная задача оптимизации при формировании поколений новой техники. Показана редукция многокритериальной задачи к последовательности классических задач однокритериальной оптимизации.

### Список литературы

1. Баркалов С.А. Оптимизационные модели – инструмент системного моделирования: моногр. / С.А. Баркалов, П.Н. Курочка, Л.Д. Маилян, Е.А. Серебрякова. М.: Кредо, 2023. 522 с.
2. Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А. Теория графов в управлении организационными системами. М.: Синтег, 2001. 124 с.
3. Баркалов С.А. Ресурсное планирование проектного управления: моногр. / С.А. Баркалов, П.Н. Курочка, Л.Д. Маилян, Е.А. Серебрякова. М.: Кредо, 2024. 530 с.
4. Медведев С.Н. Жадные и адаптивный алгоритмы решения задачи маршрутизации транспортных средств с несколькими центрами с чередованием объектов // Автоматика и телемеханика. 2023. № 3. С. 139–168. DOI: 10.31857/S0005231023030078
5. Баркалов С.А. Моделирование инновационного развития фирмы / С.А. Баркалов, И.В. Буркова, П.Н. Курочка, Е.А. Серебрякова // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 2 (18). С. 49–64. DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-49-64
6. Фатхутдинов Р.А. Инновационный менеджмент. СПб.: Питер Пресс, 2008. 448 с.
7. Новиков Д.А., Иващенко А.А. Модели и методы организационного управления инновационным развитием фирмы. М.: КомКнига, 2006. 332 с.
8. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. М.: Инфра-М, 2020. 450 с.
9. Бурков В.Н., Буркова И.В. Задачи дихотомической оптимизации. М.: Радио и связь, 2003. 156 с.
10. Barkalov S., Burkov V., Kurochka P. Designing Systems of Group Stimulation in the Management of Energy Complex Objects // International Scientific Conference Energy Management of Municipal

Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Ser. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 983. Springer, Cham, 2019. P. 55–68. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8\_6

11. Баркалов С.А., Курочка П.Н., Курносое В.Б. Статистика. Воронеж: Воронежский гос. архитектурно-строит. ун-т, 2010. 775 с.

12. Курочка П.Н., Сеферов Г.Г. Модель управления объемами незавершенного производства при произвольной связи между работами проекта // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, № 4. С. 178–182.

13. Белов М.В. Оптимальное управление жизненными циклами сложных изделий, объектов, систем // Проблемы управления. 2022. № 1. С. 19–32. DOI: 10.25728/ru.2022.1.2

14. Дранко О.И. Модель финансового прогнозирования и сценарии внутренних инвестиций // Проблемы управления. 2007. № 1. С. 37–40.

15. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Model for determining the term of execution of sub-conflicting works // 2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). Moscow, Russia, 2017. P. 8109598. DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109598

16. Кофман А., Анри-Лабордер А. Методы и модели исследования операций: пер. с фр. М.: Мир, 1977. 432 с.

17. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход: пер. с англ. М.: Мир, 1978. 435 с.

### References

1. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Mailyan L.D., Serebryakova E.A. *Optimizatsionnye modeli – instrument sistemnogo modelirovaniya: monografiya* [Optimization models – a tool for system modeling: monograph]. Moscow: Kreda; 2023. 522 p. (In Russ.)

2. Burkov V.N., Zalozhnev A.Yu., Novikov D.A. *Teoriya grafov v upravlenii organizatsionnymi sistemami* [Graph theory in the management of organizational systems]. Moscow: Sinteg; 2001. 124 p. (In Russ.)

3. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Mailyan L.D., Serebryakova E.A. *Resursnoe planirovanie proektnogo upravleniya: monografiya* [Resource planning of project management: monograph]. Moscow: Kreda; 2024. 530 p. (In Russ.)

4. Medvedev S.N. Greedy and Adaptive Algorithms for Multi-Depot Vehicle Routing with Object Alternation. *Automation and Remote Control*. 2023;84(3):305–325. DOI: 10.1134/S0005117923030086

5. Barkalov S.A., Burkova I.V., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Modeling the innovative development of the firm. *Vestnik of Tver state technical university. Series “Technical science”*. 2023;2(18):49–64. DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-49-64

6. Fatkhutdinov R.A. *Innovatsionnyy menedzhment* [Innovative management]. St. Petersburg: Piter Press; 2008. 448 p. (In Russ.)

7. Novikov D.A., Ivashchenko A.A. *Modeli i metody organizatsionnogo upravleniya innovatsionnym razvitiem firmy* [Models and methods of organizational management of the innovative development of the firm]. Moscow: KomKniga; 2006. 332 p. (In Russ.)

8. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *The effective management of organizational and production structures: monograph*. Moscow: Infa-M; 2020. 450 p. (In Russ.)

9. Burkov V.N., Burkova I.V. *Zadachi dikhotoomicheskoy optimizatsii* [Problems of dichotomous optimization]. Moscow: Radio i svyaz'; 2003. 156 p. (In Russ.)

10. Barkalov S., Burkov V., Kurochka P. Designing Systems of Group Stimulation in the Management of Energy Complex Objects. In: *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. Ser. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 983*. Springer, Cham; 2019. P. 55–68. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8\_6

11. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Kurnosov V.B. *Statistika* [Statistics]. Voronezh: Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering; 2010. 775 p. (In Russ.)

12. Kurochka P.N., Seferov G.G. Model of management in volumes of the work in progress at any communication between works of the project. *Bulletin of Voronezh state technical university*. 2011;7(4):178–182. (In Russ.)

13. Belov M.V. Optimal control of the life cycle of complex systems. *Control Sciences*. 2022;(1):15–26. DOI: 10.25728/cs.2022.1.2

14. Dranko O.I. A financial prediction model and home investment scenarios. *Control Sciences*. 2007;(1):37–40. (In Russ.)
15. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Model for determining the term of execution of sub-conflicting works. In: *2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD)*. Moscow, Russia; 2017. P. 8109598. DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109598
16. Kaufmann A., Henry-Labordere A. *Methods and models of operations research*. Transl. from French. Moscow: Mir; 1977. 432 p. (In Russ.)
17. Christofides N. *Graph theory. Algorithmic approach*. Transl. from Engl. Moscow: Mir; 1978. 435 p. (In Russ.)

#### ***Информация об авторах***

**Баркалов Сергей Алексеевич**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, декан факультета экономики, менеджмента и информационных технологий, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sbarkalov@nm.ru.

**Курочка Павел Николаевич**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; kpn55@rambler.ru.

**Серебрякова Елена Анатольевна**, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sea-parish@mail.ru.

#### ***Information about the authors***

**Sergey A. Barkalov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Dean of the Faculty of Economics, Management and Information Technologies, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sbarkalov@nm.ru.

**Pavel N. Kurochka**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; kpn55@rambler.ru.

**Elena A. Serebryakova**, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sea-parish@mail.ru.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

**Статья поступила в редакцию 24.12.2024**

**The article was submitted 24.12.2024**

## От редакционной коллегии From the editorial board

В связи с выявлением случая недобросовестного заимствования (скрытого цитирования) и нарушения этики научных публикаций редакционная коллегия научного журнала «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» исключает из всех ресурсов статью Павловской О.О. «Теория информационных цепей и оценка человеческого фактора в управлении», опубликованную в журнале «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2006. № 14 (69). С. 122–127.

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

1. **Тематика.** В журнале публикуются статьи по следующим научным направлениям: управление в различных отраслях техники, а также в административной, коммерческой и финансовой сферах; математическое, алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение компьютерных технологий, в том числе компьютерных комплексов, систем и сетей; измерительные системы, приборостроение, радиоэлектроника и связь.

### 2. Структура статьи:

До основного текста статьи приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- тип статьи: научная, обзорная, дискуссионная, персоналии, рецензия, краткое сообщение и т. п.;
- УДК;
- название (не более 12–15 слов);
- основные сведения об авторе (авторах):
  - имя, отчество, фамилия автора (полностью);
  - наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), где работает или учится автор;
  - электронный адрес автора (e-mail);
  - открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии в форме электронного адреса в сети Интернет;
- аннотация (200–250 слов),
- ключевые слова (словосочетания);
- благодарности (при наличии).

Основной текст статьи может состоять из следующих частей:

- введение;
- текст статьи (структурированный по разделам). Допускается деление основного текста статьи на тематические рубрики и подрубрики. Надписи и подписи к иллюстрированному материалу приводят на языке текста статьи и повторяют на английском языке;

- заключение.

После основного текста статьи приводят:

- Список литературы (в порядке цитирования, по ГОСТ Р 7.0.5–2008 для затекстовых библиографических ссылок);

- References (составляется согласно Vancouver Style, при транслитерации используется стандарт BGN), doi предпочтительнее приводить в форме электронного адреса в сети Интернет.

Приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- дополнительные сведения об авторе (авторах): фамилия, имя, отчество автора (полностью), ученая степень, ученое звание, должность, наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), e-mail, ORCID;
- сведения о вкладе каждого автора, указание об отсутствии или наличии конфликта интересов;
- даты поступления статьи в редакцию, одобрения после рецензирования, принятия статьи к опубликованию.

3. **Параметры набора:** шрифт – Times New Roman, кегль – 14, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание – по ширине.

4. **Формулы.** Набираются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 11 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

5. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

6. **Адрес редакционной коллегии.** 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, корп. 3б, 4-й этаж – Высшая школа электроники и компьютерных наук, отв. секретарю Захарову В.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: zakharovvv@susu.ru.

7. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала <http://vestnik.susu.ru/ctcr>.

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

## СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» основан в 2001 году.

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Главный редактор – д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ Логиновский Олег Витальевич.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки); 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки); 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки).

Подписной индекс 29008 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность выхода – 4 номера в год.

Адрес редакции, издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 32.

ВЕСТНИК  
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия  
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»  
2025. Том 25, № 2

16+

Редактор *С.И. Уварова*  
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 28.04.2025. Дата выхода в свет 07.05.2025. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 14,41. Тираж 500 экз. Заказ 90/122. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.