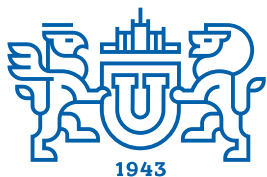


ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2026
Т.26, № 3

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);
Мельников А.В., д.т.н., проф. (*зам. гл. редактора*) (г. Ханты-Мансийск);
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);
Болодурина И.П., д.т.н., проф. (г. Оренбург);
Джапаров Б.А., д.т.н., проф. (г. Астана, Казахстан);
Дранко О.И., д.т.н., доц. (г. Москва);
Ефанов В.Н., д.т.н., проф. (г. Уфа);
Затонский А.В., д.т.н., проф. (г. Пермь);
Максимов А.А., д.т.н. (г. Новокузнецк);
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);
Браверман Е., PhD, проф. (г. Калгари, Канада);
Дегтярь В.Г., д.т.н., проф., академик РАН (г. Миасс, Челябинская обл.);
Казаринов Л.С., д.т.н., проф. (г. Челябинск);
Кибалов Е.Б., д.э.н., проф. (г. Новосибирск);
Лясковская Е.А., д.э.н., доц. (г. Челябинск);
Новиков Д.А., д.т.н., проф., академик 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);
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., доц. (г. Челябинск);
Штессель Ю., PhD, проф. (г. Хантсвилл, Алабама, США)



BULLETIN

OF THE SOUTH URAL
STATE UNIVERSITY

2026

Vol. 26, no. 3

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;

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

Hollay 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;

Bolodurina I.P., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation;

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

Dranko O.I., Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Efanov V.N., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation;

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;

Maksimov A.A., Dr. of Sci. (Eng.), State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation, Novokuznetsk, 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;

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., Academician 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;

Lyaskovskaya E.A., Dr. of Sci. (Econ.), Ass. Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Novikov D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Academician 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., South Ural State University, 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;

Ushakov V.N., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, N.N. Krasovskiy 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.), Ass. Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

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

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и вычислительная техника

ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ГОЛЛАЙ А.В., БРАЖЕНКО С.А. Метод выбора архитектуры внедрения LLM, RAG и ИИ-агентов в корпоративные ИС и СППР	5
ЛЮТОВ А.Г., НОВОЖЕНИН М.Б., ХЕЛИМСКИЙ А.А., ОЛИВЕРА ЗАХАРОВ Х.А. Обзор зарубежных исследований в области интеллектуальных подходов к оценке состояния водителя транспортных средств	16

Управление в технических системах

ТЕЛЕГИН А.И., ВОЛОВИЧ Г.И., ГУСЕВ Е.В., ШИРЯЕВ В.И., ПУДОВКИНА С.Г. Алгоритмы и JS-коды решения первой задачи динамики ангулярных манипуляторов в ХЗД	26
ЗАТОНСКИЙ А.В., СЕРГЕЕВ Н.О. Метод идентификации уклонений горно-выемочной машины на основе фильтрации данных бортовых датчиков расстояния	46

Управление в социально-экономических системах

ТАРАСОВА Л.С., СТОЛБОВА И.Д. Интеллектуальное управление в эпоху цифровизации: персонализация и контроль в предметном обучении	56
БАРКАЛОВ С.А., БЕЛОУСОВ А.В., БЕКИРОВА О.Н. Задачи и алгоритмы синтеза и согласования знаний для комбинированных экспертных систем	68
МИКРЮКОВ А.А., ЗАХАРОВ В.В. Анализ данных и постановка задачи машинного обучения в управлении товарными запасами при цензурированном спросе	79
БАРКАЛОВ С.А., КУРОЧКА П.Н. Стохастическая модель распределения ресурсов типа «мощности»	89

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ГОРДЕЕВ И.К. Методика формирования цифрового контура «темной фабрики» пресового отделения	103
---	-----

CONTENTS

Informatics and computer engineering

LOGINOVSKIY O.V., HOLLAY A.V., BRAZHENKO S.A. A method for selecting the architecture of LLM, RAG, and AI agent deployment in corporate information systems and decision support systems	5
--	---

LUTOV A.G., NOVOZHENIN M.B., KHELIMSKII A.A., OLIVERA ZAKHAROV K.A. Review of foreign research in the field of intelligent approaches to assessing the condition of the driver of vehicles	16
--	----

Control in technical systems

TELEGIN A.I., VOLOVICH G.I., GUSEV E.V., SHIRIAEV V.I., PUDOVKINA S.G. Algorithms and JS codes for solving the first problem of dynamics of angular manipulators in X3D	26
---	----

ZATONSKIY A.V., SERGEEV N.O. Method for identifying deviations of a mining machine based on filtering of data from onboard distance sensors	46
---	----

Control in social and economic systems

TARASOVA L.S., STOLBOVA I.D. Intelligent management in the era of digitalization: personalization and control in subject-based education	56
--	----

BARKALOV S.A., BELOUSOV A.V., BEKIROVA O.N. Problems and synthesis algorithms and approvals of knowledge for the combined expert systems	68
--	----

MIKRYUKOV A.A., ZAKHAROV V.V. Data analysis and machine learning problem formulation in inventory management under censored demand	79
--	----

BARKALOV S.A., KUROCHKA P.N. Stochastic model of capacity type resource allocation	89
--	----

Automated process control systems

LOGINOVSKIY O.V., GORDEEV I.K. Methodology for forming the digital control loop of a dark factory press department	103
--	-----

Информатика и вычислительная техника Informatics and computer engineering

Научная статья

УДК 004.9, 658.5

DOI: 10.14529/ctcr260301

МЕТОД ВЫБОРА АРХИТЕКТУРЫ ВНЕДРЕНИЯ LLM, RAG И ИИ-АГЕНТОВ В КОРПОРАТИВНЫЕ ИС И СППР

О.В. Логиновский, loginovskii@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

А.В. Голлай, gollaiav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

С.А. Браженко, bsa@uralto.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3524-9882>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Цель исследования. Целью исследования является разработка метода выбора архитектуры внедрения LLM-подсистем, решений класса Retrieval-Augmented Generation (RAG) и ИИ-агентов в корпоративные информационные системы и системы поддержки принятия решений. Актуальность работы обусловлена тем, что в enterprise-среде выбор интеллектуальной подсистемы определяется не только качеством генерации, но и требованиями к объяснимости, управляемости, глубине интеграции, работе с корпоративными данными, допустимому уровню автономности и цене ошибки. **Материалы и методы.** В работе использованы системный и сравнительный анализ, архитектурное моделирование, классификация, экспертная декомпозиция критериев и элементы многокритериального выбора. Рассматриваются пять архитектурных классов: изолированная LLM-подсистема, подсистема класса RAG, LLM-контур с инструментальным доступом, агентная интеллектуальная подсистема и гибридная управляемая архитектура. Для их сопоставления сформирована система критериев, включающая тип задачи, потребность в корпоративном контексте, необходимость действий во внешних системах, требования к точности, объяснимости и аудируемости, чувствительность данных, зрелость enterprise-контура и допустимый уровень автономности. **Результаты.** Предложен полуформальный метод выбора архитектуры внедрения, сочетающий отсеивающие и ранжирующие критерии, весовую корректировку и возможность определения переходной архитектуры при недостаточной зрелости данных и интеграций. Метод представлен как воспроизводимая процедура, включающая формирование профиля задачи, фильтрацию по критическим ограничениям, оценивание допустимых архитектур по шкале соответствия и уточнение выбора с учётом зрелости корпоративной среды. Практическая применимость метода показана на типовых сценариях торгово-производственного предприятия: доступ к внутренним регламентам, подготовка управленческой сводки, рекомендация менеджеру по типовой заявке и многошаговая обработка внутреннего инцидента. Показано, что разные классы задач закономерно приводят к различным архитектурным решениям: retrieval-ориентированным, tool-augmented, agent-based или hybrid controlled. **Заключение.** Установлено, что универсальной архитектуры внедрения интеллектуальной подсистемы для корпоративных ИС и СППР не существует. Рациональный выбор определяется совокупностью технологических, организационных, инфраструктурных и управленческих факторов. Предложенный метод может использоваться при предварительном проектировании и поэтапном развитии интеллектуальных подсистем в организациях, ориентированных на автоматизацию управленческих и информационно-аналитических процессов.

Ключевые слова: большие языковые модели, LLM, Retrieval-Augmented Generation, RAG, ИИ-агенты, корпоративные информационные системы, системы поддержки принятия решений

Для цитирования: Логиновский О.В., Голлай А.В., Браженко С.А. Метод выбора архитектуры внедрения LLM, RAG и ИИ-агентов в корпоративные ИС и СППР // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 3. С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr260301

A METHOD FOR SELECTING THE ARCHITECTURE OF LLM, RAG, AND AI AGENT DEPLOYMENT IN CORPORATE INFORMATION SYSTEMS AND DECISION SUPPORT SYSTEMS

O.V. Loginovskiy, loginovskii@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

A.V. Hollay, gollaia@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

S.A. Brazhenko, bsa@uralto.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3524-9882>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Purpose of the study. The purpose of the study is to develop a method for selecting the deployment architecture of LLM subsystems, Retrieval-Augmented Generation (RAG) solutions, and AI agents in corporate information systems and decision support systems. The study is relevant because in the enterprise environment the choice of an intelligent subsystem depends not only on generation quality, but also on explainability, controllability, integration depth, work with corporate data, acceptable autonomy, and the cost of error. **Materials and methods.** The study uses system and comparative analysis, architectural modeling, classification, expert decomposition of criteria, and elements of multicriteria decision-making. Five architectural classes are considered: an isolated LLM subsystem, a RAG-based subsystem, an LLM contour with tool access, an agent-based intelligent subsystem, and a hybrid controlled architecture. Comparison criteria include task type, dependence on corporate context, need for actions in external systems, requirements for accuracy, explainability and auditability, data sensitivity, enterprise environment maturity, and acceptable autonomy. **Results.** A semi-formal architecture selection method is proposed. It combines filtering and ranking criteria, weight adjustment, and the possibility of determining an intermediate architecture when data and integrations are insufficiently mature. The method is implemented as a reproducible procedure including task profile formation, filtering by critical constraints, evaluation of admissible architectures, and refinement of the choice according to enterprise maturity. Its applicability is demonstrated using scenarios of a trade-and-production enterprise: access to internal regulations, managerial reporting, recommendation generation for a standard customer request, and multi-step handling of an internal incident. **Conclusion.** There is no universal deployment architecture for an intelligent subsystem in corporate information systems and decision support systems. A rational choice is determined by technological, organizational, infrastructural, and managerial factors. The proposed method can be used for preliminary design and phased development of intelligent subsystems in organizations focused on automating managerial and information-analytical processes.

Keywords: large language models, LLM, Retrieval-Augmented Generation, RAG, AI agents, corporate information systems, decision support systems

For citation: Loginovskiy O.V., Hollay A.V., Brazhenko S.A. A method for selecting the architecture of LLM, RAG, and AI agent deployment in corporate information systems and decision support systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(3):5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260301

Введение

В последние годы большие языковые модели переходят из стадии экспериментальных решений в область практически значимых инструментов автоматизации, поиска знаний, аналитической поддержки и сопровождения управленческих процессов на предприятиях [1–3]. При этом развитие генеративного искусственного интеллекта в корпоративной среде идет по нескольким направлениям: наряду с изолированными LLM-подсистемами все шире применяются решения класса Retrieval-Augmented Generation, инструментально-расширенные конфигурации и агентные системы, способные взаимодействовать с внешними сервисами и выполнять многошаговые действия [1, 2]. Одновременно расширяется и спектр рисков, связанных с недостоверностью генерации, галлюцинациями, ограниченной проверяемостью выводов и сложностью контроля поведения интеллектуальных подсистем [3].

По мере расширения спектра доступных решений на первый план выходит не только технологическая, но и управленческая задача: какой вариант архитектуры целесообразен в конкретных

условиях предприятия. Для корпоративных информационных систем и систем поддержки принятия решений такой выбор зависит от цены ошибки, чувствительности данных, требований к объяснимости и глубины интеграции с действующей информационной инфраструктурой.

Анализ рассмотренных публикаций показывает недостаточную проработанность вопроса сопоставления изолированных LLM-подсистем, решений класса RAG и агентных систем как альтернативных архитектурных классов для корпоративных ИС и СППР. В доступной и рассмотренной литературе вопрос выбора между указанными архитектурными классами представлен фрагментарно, хотя отдельные исследования уже посвящены применению LLM и RAG в корпоративных ассистентах, использованию больших языковых моделей в производственных и MES-контурах, а также агентным моделям поддержки принятия решений [4, 5]. Вместе с тем при внедрении ИИ в организационную среду все более значимыми становятся не только характеристики самой технологии, но и стратегические, ресурсные и организационные условия внедрения [6–8].

Объектом исследования являются корпоративные информационные системы и системы поддержки принятия решений предприятий, в рамках которых рассматривается внедрение интеллектуальных подсистем на основе больших языковых моделей.

Предмет исследования составляют критерии, архитектурные паттерны и метод выбора вариантов внедрения LLM-подсистем, RAG и ИИ-агентов с учетом требований к качеству решений, безопасности, объяснимости, интеграции и степени автономности.

Цель исследования состоит в разработке метода выбора архитектуры внедрения интеллектуальных подсистем в корпоративные ИС и СППР на основе сравнительного анализа их функциональных возможностей, ограничений, рисков и условий практического применения.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи: проанализировать существующие подходы к внедрению больших языковых моделей в корпоративную среду; выделить и описать основные архитектурные классы внедрения; сформировать систему критериев выбора архитектуры; выполнить сравнительный анализ архитектурных классов; разработать метод предварительного выбора архитектуры; показать применимость метода на типовых сценариях торгово-производственного предприятия.

Методологическую основу исследования составляют системный и сравнительный анализ, архитектурное моделирование, классификация, экспертная декомпозиция критериев и элементы многокритериального выбора [9–13]. Практическая значимость работы определяется возможностью использования предложенного метода при проектировании и модернизации корпоративных ИС и СППР.

Научная новизна исследования заключается в следующем. Предложена классификация архитектур внедрения LLM-подсистем, решений класса RAG, tool-augmented LLM, agent-based systems и гибридной управляемой архитектуры для корпоративных ИС и СППР. Сформирована система критериев выбора архитектуры с учетом enterprise-ограничений. Разработан полуформальный метод предварительного выбора архитектуры. Показана применимость метода на типовых сценариях торгово-производственного предприятия.

Архитектурные классы внедрения LLM-подсистем в корпоративные ИС и СППР

Развитие больших языковых моделей в корпоративной среде привело к формированию нескольких устойчивых вариантов их практической реализации. Несмотря на общую опору на генеративные модели, такие решения существенно различаются по способу работы с внутренними данными предприятия, глубине интеграции с информационными сервисами, допустимому уровню автономности и требованиям к контролю. Для целей настоящего исследования выделяются пять базовых классов: изолированная LLM-подсистема, решение класса RAG, LLM-контур с инструментальным доступом, агентная интеллектуальная подсистема и гибридная управляемая конфигурация.

Изолированная LLM-подсистема

Наиболее простым вариантом реализации является изолированная LLM-подсистема, в которой ответ формируется на основе системного промпта и пользовательского запроса без опоры на внешний корпоративный контекст, retrieval-механизм или контур исполнения действий. Подобный подход удобен на ранних этапах пилотирования, однако он ограничен в зрелом контуре СППР: отсутствие доступа к актуальным корпоративным источникам снижает достоверность ответа, повышает вероятность галлюцинаций и затрудняет проверку оснований, на которых построен вывод.

Подсистема класса RAG

Подсистема класса RAG опирается на внешнее хранилище корпоративных знаний и дополняет генерацию извлечением релевантных фрагментов документов, регламентов, инструкций и записей из баз знаний. Такой подход оправдан в ситуациях, когда ответ должен опираться не на усредненные параметры модели, а на актуальное содержание внутреннего контура организации [1, 4].

Внутри данного класса целесообразно выделять graph-based RAG как специализированный вариант retrieval-подхода для случаев, где смысл распределен между связанными сущностями, а не сосредоточен в одном фрагменте текста. Graph RAG особенно полезен при multi-hop retrieval, глобальных вопросах по документному массиву, объяснимой provenance-трассировке и смешанных русско-английских корпусах, где важны связи между узлами, маршруты обхода и приоритеты наподобие PageRank [14].

LLM-подсистема с инструментальным доступом

Промежуточное положение между retrieval-решениями и агентными системами занимает LLM-подсистема, дополненная инструментальным доступом к корпоративным сервисам. В этом случае модель получает возможность обращаться к API, извлекать данные из CRM, ERP, BI, MES или иных платформ и интерпретировать результат [15]. Такой вариант особенно полезен в прикладных управленческих сценариях, где требуется не просто сослаться на документ, а получить актуальные значения показателей, статусов или остатков.

Агентная интеллектуальная подсистема

Агентный класс решений ориентирован на более сложные сценарии, в которых система должна интерпретировать цель, разложить ее на последовательность шагов, выбрать нужные инструменты, обратиться к нескольким источникам, сопоставить промежуточные результаты и при необходимости скорректировать дальнейший ход выполнения [2, 5, 16]. Подобные решения наиболее востребованы в многошаговых процессах, охватывающих несколько корпоративных сервисов и требующих orchestration на уровне бизнес-логики.

Гибридная управляемая архитектура

Наиболее зрелым вариантом внедрения для enterprise-контуров является гибридная управляемая конфигурация, объединяющая retrieval-механизм, инструментальный доступ к корпоративным сервисам, ролевые ограничения, правила валидации, журналирование и human-in-the-loop. Гибридный подход особенно уместен там, где цена ошибки высока, данные чувствительны, а система должна работать в формализованной организационной среде.

Для обобщённого сопоставления выделенных архитектурных классов далее представлена табл. 1, в которой они систематизированы по характеру работы с корпоративным контекстом и данными, уровню интеграции и автономности, требованиям к объяснимости и риск-профилю, а также по типовым сценариям применения.

Сравнительный анализ архитектурных классов внедрения

Таблица 1

Table 1

Comparative Analysis of Deployment Architecture Classes

Класс	Контекст и данные	Интеграция / автономность	Объяснимость / риск	Типовые сценарии
Изолированная LLM-подсистема	Слабая опора на корпоративные данные	Низкая / низкая	Низкая / высокий	Черновая генерация, вспомогательные задачи
RAG	Высокая опора на корпоративную базу знаний	Средняя / низкая	Высокая / средний	Доступ к регламентам, поиск знаний
Tool-augmented LLM	Данные CRM/ERP/BI	Высокая / средняя	Средняя / средний	Аналитические сводки, получение данных из ИС
Agent-based subsystem	Многошаговые процессы	Высокая / высокая	Средняя / повышенный	Инциденты, orchestration
Hybrid controlled architecture	Знания + данные + контроль	Высокая / управляемая	Высокая / контролируемый	Высокорисковые enterprise-сценарии

Как следует из табл. 1, различия между архитектурными классами проявляются не только в технической реализации, но и в степени их пригодности к использованию в конкретных управленческих и организационных условиях корпоративной среды. Следовательно, сопоставление архитектурных классов должно выполняться не только по признаку технологической сложности, но и по их соответствию профилю задачи, ограничениям enterprise-контура и требованиям к контролю результата, что требует перехода к системе критериев их выбора.

Система критериев выбора архитектуры

Сопоставление архитектурных классов внедрения требует выхода за пределы чисто технологического сравнения. В корпоративной среде решение о выборе интеллектуальной подсистемы определяется не только качеством генерации, но и тем, насколько конкретный вариант реализации соответствует управленческим задачам предприятия, ограничениям его информационной инфраструктуры и требованиям к контролю результата.

Для целей настоящего исследования критерии выбора группируются по функционально-целевому, качественному, корпоративному, интеграционно-инфраструктурному и управленческому блокам. Это позволяет связать свойства рассматриваемых архитектур не только с техническими особенностями, но и с реальными условиями внедрения на предприятии.

Функционально-целевые критерии

Ключевое значение имеет тип задачи: информационная, аналитическая, рекомендательная, исполнительная или многошаговая. Чем сложнее логика выполнения и выше зависимость от внутренних данных, тем выше требования к retrieval, интеграции и orchestration.

Критерии качества и надежности

В корпоративной среде особенно важно учитывать приемлемый уровень галлюцинаций, требования к точности, актуальности, объяснимости и проверяемости результатов [3, 17].

Критерии корпоративной среды

Существенное значение имеют чувствительность данных, необходимость закрытого развертывания и зрелость корпоративного фонда знаний. Российские исследования внедрения ИИ в организационные практики показывают, что фактическое использование подобных технологий сопровождается не только новыми возможностями, но и комплексом организационных и риск-ориентированных ограничений [6–8].

Интеграционно-инфраструктурные критерии

Критическим параметром является необходимость выполнения действий во внешних системах. Пока система ограничивается поиском, интерпретацией или подготовкой рекомендаций, достаточно информационно-аналитических решений. Если же требуется инициировать операции во внешних системах, возникает потребность в инструментальном или агентном контуре.

Управленческие критерии

К этой группе относятся цена ошибки, допустимый уровень автономности, требования к аудируемости, журналированию и регламентируемости. Именно эти параметры чаще всего определяют границы допустимого внедрения в enterprise-среде.

Сравнительный анализ архитектур внедрения

Сопоставление архитектурных классов показывает, что они различаются не только технологической сложностью, но и характером участия в информационном и управленческом цикле предприятия. Изолированные LLM-подсистемы удобны для низкорисковых вспомогательных задач; RAG-решения – для работы с корпоративными знаниями; tool-augmented LLM – для получения актуальных данных из ИС; agent-based подсистемы – для многошаговых процессов; hybrid controlled architecture – для высокорисковых enterprise-сценариев.

Следовательно, для корпоративных ИС и СППР необходим специальный метод выбора архитектуры, учитывающий одновременно тип задачи, ограничения среды и уровень зрелости интеграционного контура.

Метод выбора архитектуры внедрения

Проведенный сравнительный анализ показывает, что сопоставление архитектурных классов само по себе еще не решает задачу проектирования интеллектуальной подсистемы для корпоративной среды. Предлагаемый метод ориентирован на согласование характеристик задачи, профиля ограничений и зрелости enterprise-контура.

Предлагаемый метод задает воспроизводимую схему выбора, включающую формирование профиля задачи, фильтрацию по критическим ограничениям, ранжирование допустимых архитектур, корректировку результата по зрелости enterprise-контура и определение целевой либо переходной архитектуры.

Структура входных параметров метода

Входом метода является профиль задачи, включающий шесть групп параметров: функциональный профиль задачи; критичность ошибки; потребность в корпоративном контексте; потребность в действиях во внешних системах; требования к объяснимости и аудируемости; зрелость enterprise-контура.

Отсеивающие критерии

На первом этапе применяются критерии, которые не ранжируют архитектуры, а исключают заведомо неподходящие варианты: высокая цена ошибки, критическая чувствительность данных, обязательная объяснимость, необходимость журналирования, запрет автономных действий без подтверждения человека и отсутствие допустимой инфраструктуры развертывания.

Ранжирующие критерии и шкала оценки

После применения отсеивающих критериев допустимые архитектуры сопоставляются по интегральной шкале. На этом этапе метод уже не отвечает на вопрос, можно ли использовать тот или иной класс решений в принципе, а показывает, какая из допустимых альтернатив лучше соответствует условиям задачи.

Оценка строится по шести критериям, позволяющим связать архитектурное решение с бизнес-сценарием, корпоративным контуром и требованиями к контролю результата.

C_1 – соответствие типу задачи. Критерий отражает, насколько архитектура пригодна для справочных, аналитических, рекомендательных и многошаговых процессов.

C_2 – работа с корпоративным контекстом. Здесь учитываются глубина использования внутренних данных, плотность связей между фрагментами знаний, потребность в multi-hop retrieval и риск кросс-языковой потери контекста при смешанных корпусах.

C_3 – работа с актуальными данными. Критерий показывает, требуется ли архитектуре доступ к оперативно обновляемым источникам, внешним сервисам и транзакционным системам.

C_4 – соответствие требуемому уровню автономности. Он отражает, нужно ли решение только для ответа на запрос или для оркестрации последовательности действий и выбора промежуточных шагов.

C_5 – соответствие требованиям explainability и audit. Здесь оцениваются объяснимость результата, прозрачность цепочки вывода, возможность проверки источников и требования к provenance.

C_6 – реализуемость в организационно-технологическом контуре предприятия. При оценке учитываются зрелость интеграций, качество данных, стоимость внедрения и готовность поддерживать более сложные механизмы retrieval, включая graph-based processing [14].

Интегральная оценка архитектуры определяется формулой

$$S(A) = \sum(w_i \cdot C_i), \quad (1)$$

где $S(A)$ – интегральная оценка архитектуры, C_i – значение соответствующего критерия, а w_i – его относительная значимость.

Весовая корректировка

Весовая корректировка вводится для того, чтобы одна и та же шкала могла применяться в задачах с разной ценой ошибки и разным профилем ограничений.

Итоговая оценка допустимой архитектуры в этом случае рассчитывается по формуле

$$S(A) = \sum(w_i \cdot C_i), \quad (2)$$

где $S(A)$ – интегральная оценка архитектуры A , C_i – значение критерия, а w_i – его относительная значимость в конкретном классе задач.

Такой механизм позволяет смещать приоритеты без изменения самой системы критериев. Для справочных сценариев обычно усиливается значение критериев C_2 и C_3 . Для высокорисковых управленческих решений возрастает роль C_5 . Если задача связана с плотной сетью ссылок, расследованием инцидентов или traversal по связанным документам, дополнительно усиливаются C_2 и C_6 , поскольку graph-based retrieval требует иной зрелости данных и инфраструктуры [14].

Определение весов критериев

В предлагаемом методе веса критериев не задаются раз и навсегда, а определяются под конкретный класс задач и состояние корпоративной среды.

Практическое определение весов целесообразно строить как экспертную процедуру с участием архитекторов корпоративных ИС, аналитиков бизнес-процессов и специалистов по данным.

На первом этапе формируется перечень сценариев, для которых метод будет применяться, после чего эксперты выполняют попарные сравнения критериев применительно к выбранному сценарию.

Индивидуальные матрицы сравнений агрегируются, после чего вычисляется нормированный вектор весов, удовлетворяющий условию формулы

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (3)$$

Полученный вектор интерпретируется как профиль приоритетов для конкретного сценария выбора архитектуры.

Далее веса могут применяться повторно для близких задач, однако при изменении структуры данных, регуляторных требований или глубины knowledge graph их следует пересматривать [14].

Для контроля устойчивости экспертных суждений целесообразно использовать индекс и отношение согласованности; при заметных расхождениях процедура повторяется.

Тем самым метод не навязывает универсального набора приоритетов, а адаптирует ранжирование архитектур к условиям предприятия.

Таблица 2

Критерии метода выбора архитектуры

Table 2

Criteria of the Architecture Selection Method

Критерий	Тип	Значения	Влияние
Цена ошибки	Отсев / вес	Низкая / средняя / высокая	Исключает isolated LLM и часть agent-based решений
Чувствительность данных	Отсев	Низкая / высокая	Задаёт требования к закрытому контуру
Корпоративный контекст	Ранг	Нет / умеренный / высокий	Усиливает RAG и hybrid
Действия в системах	Ранг	Нет / ограничено / да	Усиливает tools и agents
Explainability / audit	Отсев / ранг	Низкое / высокое	Усиливает hybrid
Автономность	Ранг	Низкая / средняя / высокая	Влияет на выбор между hybrid и agents

Табл. 2 показывает, что критерии метода работают как единая система: часть из них отсекает архитектурно неподходящие решения, а часть позволяет различить допустимые альтернативы по качеству соответствия задаче.

При этом признаки, характерные для graph-based retrieval, не образуют отдельного класса критериев, а уточняют оценку корпоративного контекста, explainability и реализуемости, когда задача требует traversal по связанным документам и provenance по цепочке источников [14].

Правило выбора архитектуры

На первом шаге формируется множество допустимых архитектур A^* после применения критических ограничений. Затем каждая из оставшихся альтернатив получает интегральную оценку $S(A)$ по выбранным критериям и весам. Архитектура с наибольшим значением рассматривается как целевая. Если для ее внедрения недостаточны зрелость данных, глубина интеграции или средства контроля, метод допускает выбор переходного варианта с последующим усложнением.

Псевдоалгоритм выбора архитектуры

Шаг 1 – определить тип задачи, ожидаемый формат результата и цену ошибки.

Шаг 2 – зафиксировать критические ограничения по данным, безопасности, explainability и степени допустимой автономности.

Шаг 3 – установить, нужен ли задаче корпоративный контекст, доступ к актуальным системам и multi-hop retrieval по связанным знаниям.

Шаг 4 – исключить архитектуры, которые не удовлетворяют обязательным ограничениям.

Шаг 5 – оценить допустимые архитектуры по критериям C_1 – C_6 .

Шаг 6 – назначить веса критериев с учетом сценария применения и зрелости корпоративного контура.

Шаг 7 – рассчитать интегральные оценки и упорядочить альтернативы.

Шаг 8 – проверить реализуемость лидирующей архитектуры, включая качество данных, интеграции, provenance и эксплуатационные ограничения.

Шаг 9 – выбрать целевую архитектуру и, при необходимости, зафиксировать переходный вариант внедрения.

Интерпретация результатов выбора

Предлагаемый метод не сводится к механическому выбору единственной архитектуры. В реальном enterprise-проекте он позволяет развести целевой и переходный варианты, если зрелость данных, глубина интеграции и механизмы контроля развиваются не одновременно.

Именно поэтому результат интерпретируется не только как максимум интегральной оценки, но и как аргументированная рекомендация по конфигурации решения: где достаточно классического RAG, где нужен tool-augmented LLM, а где оправдано подключение agent-based subsystem или hybrid controlled architecture.

Пример применения метода на типовых сценариях торгово-производственного предприятия

Для проверки практической применимости предложенного метода рассмотрим его использование на типовых сценариях торгово-производственного предприятия, в информационном контуре которого функционируют учетная система, CRM, внутренняя база регламентов, документы по закупкам и логистике, аналитическая отчетность и сервисы обработки заявок.

Сценарий 1. Доступ к внутренним регламентам и инструкциям.

По отсеивающим критериям из числа допустимых решений исключаются варианты, не обеспечивающие устойчивой привязки к корпоративным источникам. На этапе ранжирования наибольший вес получают критерии корпоративного контекста и объяснимости. В результате базовой архитектурой остается RAG, однако при большом числе перекрестных ссылок между документами, версиями и связанными сущностями предпочтителен graph-based RAG, поскольку он лучше поддерживает multi-hop retrieval, удерживает структуру связей и делает путь к источнику проверяемым [14].

Сценарий 2. Подготовка управленческой сводки для руководителя.

На этапе предварительного отбора исключаются архитектурные варианты, не обеспечивающие взаимодействие с внешними корпоративными сервисами. При последующем ранжировании наибольшую значимость приобретают критерии интеграции с информационными системами предприятия, актуальности используемых данных и объяснимости результатов. В этих условиях в качестве целевой архитектуры рассматривается tool-augmented LLM, тогда как при повышенных требованиях к журналированию, контролю и управляемости альтернативой может выступать hybrid controlled architecture.

Сценарий 3. Рекомендация менеджеру по типовой заявке клиента.

Критическими оказываются цена ошибки, требование к explainability и необходимость сохранения контроля со стороны человека. На этапе ранжирования наибольший вес получают критерии корпоративного контекста, explainability и audit. В результате целевой архитектурой становится hybrid controlled architecture; если зрелость контура недостаточна, переходным вариантом может выступать tool-augmented LLM.

Сценарий 4. Многошаговая обработка внутреннего инцидента.

На этапе ранжирования максимальный вес получают критерии автономности, интеграции и orchestration. Целевой архитектурой становится agent-based subsystem; при повышенной цене ошибки и жестких требованиях к аудиту более предпочтительной становится гибридная конфигурация. Graph-based retrieval здесь полезен не как самостоятельный класс, а как поддерживающий слой, который связывает события, документы, связанные инциденты и регламенты в единую трассируемую цепочку.

Аналитическое представление результатов апробации

Проведенная апробация показывает, что разные типы задач закономерно приводят к различным архитектурным решениям. Справочно-информационные процессы тяготеют к retrieval-ориентированным конфигурациям, аналитические сценарии, связанные с данными нескольких систем, – к tool-augmented LLM, а управленческие и многошаговые процессы – к агентным и гибридным конфигурациям. Добавление аспектов graph-based retrieval уточняет границу между случаями, где достаточно обычного RAG, и сценариями, в которых критичны связи между документами, provenance и кросс-языковой риск потери контекста [14].

Результаты применения метода к типовым сценариям

Таблица 3

Results of Applying the Method to Typical Scenarios

Table 3

Сценарий	Ограничения	Действия в системах	Целевая архитектура	Обоснование
Доступ к регламентам	Проверяемость, актуальность, связи	Нет	RAG / graph-based RAG	Нужен доступ к актуальным источникам и цепочкам ссылок
Аналитическая сводка	Высокая цена ошибки	Ограниченно	Tool-augmented LLM	Нужны актуальные данные CRM/ERP
Рекомендация менеджеру	Контроль человека	Ограниченно	Hybrid controlled	Нужны правила и human-in-the-loop
Обработка инцидента	Многошаговая логика	Да	Agent-based / hybrid	Нужны orchestration, контроль и связный контекст инцидента

Согласно табл. 3, классический RAG и его graph-based вариант естественным образом применимы в сценариях доступа к регламентам и поиска знаний, тогда как tool-augmented LLM предпочтителен для аналитических сводок, agent-based subsystem – для инцидентов, а hybrid controlled architecture – для рекомендаций руководителю.

Тем самым апробация подтверждает, что Graph RAG не образует самостоятельный архитектурный класс вне общей схемы исследования, а выступает специализированным профилем retrieval-подхода для задач со связным знанием, multi-hop retrieval и жесткими требованиями к provenance.

Для enterprise-среды это означает, что выбор retrieval-механизма следует оценивать не только по полноте ответа, но и по способности восстановить цепочку источников и связанных объектов без потери контекста при переходе между документами.

Заключение

В статье рассмотрена задача выбора архитектуры интеллектуальной подсистемы поддержки принятия решений в корпоративной информационной среде. Показано, что корректный выбор требует учета не только класса задачи, но и структуры корпоративного знания, глубины интеграции, цены ошибки и требований к контролируемости результата.

В ходе исследования выделены пять базовых архитектурных классов: базовая LLM-подсистема, подсистема класса RAG, tool-augmented LLM, agent-based subsystem и hybrid controlled architecture. Одновременно показано, что graph-based RAG следует рассматривать как специализированный вариант retrieval-подхода внутри класса RAG, а не как отдельный шестой класс [14].

Основным результатом исследования является разработка метода выбора архитектуры, сочетающего отсеивающие критерии, ранжирование по интегральной шкале и весовую корректировку. В отличие от упрощенных схем выбора, метод учитывает explainability, audit, provenance, потребность в multi-hop retrieval и риск кросс-языковой потери контекста.

Рассмотренные сценарии показывают, что для задач доступа к регламентам достаточно RAG или graph-based RAG, для аналитической сводки оправдан tool-augmented LLM, для обработки инцидентов требуется agent-based subsystem с возможной graph-based поддержкой, а для подготовки рекомендаций руководителю предпочтительна hybrid controlled architecture.

Список литературы

1. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks / P. Lewis, E. Perez, A. Piktus et al. // ArXiv preprint: arXiv:2005.11401. 2020.
2. A Survey on Large Language Model Based Autonomous Agents / L. Wang, C. Ma, X. Feng et al. // ArXiv preprint: arXiv:2308.11432. 2023.
3. A Survey on Hallucination in Large Language Models: Principles, Taxonomy, Challenges, and Open Questions / L. Huang, W. Yu, W. Ma et al. // ArXiv preprint: arXiv:2311.05232. 2023.
4. Добренко Н.В., Добренко Д.А., Улизько М.В. Интеллектуальная поддержка принятия управленческих решений в MES-системах с использованием больших языковых моделей // Экономика. Право. Инновации. 2024. № 3. С. 47–59. DOI: 10.17586/2713-1874-2024-3-47-59
5. Бурый А.С., Цаплина О.С. Агентные модели принятия решений на основе генеративного искусственного интеллекта // Правовая информатика. 2025. № 1. С. 101–109. DOI: 10.24412/1994-1404-2025-1-101-109
6. Синякова Е.А. Стратегии внедрения ИИ в редакциях местных газет: типология и организационный контекст // Вестник Московского университета. Серия 10. Журналистика. 2025. № 6. С. 80–113. DOI: 10.55959/msu.vestnik.journ.6.2025.80113
7. Использование технологий искусственного интеллекта в российских медиа и журналистике / С.Г. Давыдов, А.В. Замков, М.А. Крашенинникова, М.М. Лукина // Вестник Московского университета. Серия 10. Журналистика. 2023. № 5. С. 3–21. DOI: 10.30547/vestnik.journ.5.2023.321
8. Зуйкина К.Л., Разумова Д.В. Технологии искусственного интеллекта в работе российских СМИ: инструменты, проблемы и угрозы // Вестник Московского университета. Серия 10. Журналистика. 2025. № 5. С. 79–103. DOI: 10.55959/msu.vestnik.journ.5.2025.79103
9. Velasquez M., Hester P.T. An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods // International Journal of Operations Research. 2013. Vol. 10, no. 2. P. 56–66.
10. Ishizaka A., Nemery P. Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. DOI: 10.1002/9781118644898
11. Saaty T.L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process // International Journal of Services Sciences. 2008. Vol. 1, no. 1. P. 83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590
12. Tyree J., Akerman A. Architecture Decisions: Demystifying Architecture // IEEE Software. 2005. Vol. 22, no. 2. P. 19–27. DOI: 10.1109/MS.2005.27
13. Jansen A., Bosch J. Software Architecture as a Set of Architectural Design Decisions // Proceedings of the 5th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture. 2005. P. 109–120. DOI: 10.1109/WICSA.2005.61
14. VladSpace. Как я построил Graph RAG систему с точностью 96.7% за 5 дней: от научных статей до production-ready пайплайна // Хабр. 24.02.2026. URL: <https://habr.com/ru/articles/1003064/> (дата обращения: 23.04.2026).
15. Toolformer: Language Models Can Teach Themselves to Use Tools / T. Schick, J. Dwivedi-Yu, R. Dessi et al. // ArXiv preprint: arXiv:2302.04761. 2023.
16. ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models / S. Yao, J. Zhao, D. Yu et al. // ArXiv preprint: arXiv:2210.03629. 2022.
17. Holistic Evaluation of Language Models / P. Liang, R. Bommasani, T. Lee et al. // ArXiv preprint: arXiv:2211.09110. 2022.

References

1. Lewis P., Perez E., Piktus A., Petroni F., Karpukhin V., Goyal N., Küttler H., Lewis M., Yih W.-t., Rocktäschel T., Riedel S., Kiela D. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *ArXiv preprint: arXiv:2005.11401*. 2020.
2. Wang L., Ma C., Feng X., Zhang Z., Yang H., Zhang J., Chen Z., Tang J., Chen X., Lin Y., Zhao W.X., Wei Z., Wen J.-R. A Survey on Large Language Model Based Autonomous Agents. *ArXiv preprint: arXiv:2308.11432*. 2023.
3. Huang L., Yu W., Ma W., Zhong W., Feng Z., Wang H., Chen Q., Peng W., Feng X., Qin B., Liu T. A Survey on Hallucination in Large Language Models: Principles, Taxonomy, Challenges, and Open Questions. *ArXiv preprint: arXiv:2311.05232*. 2023.
4. Dobrenko N.V., Dobrenko D.A., Ulizko M.V. Intelligent management decision support in MES systems using large language models. *Economics. Law. Innovations*. 2024;(3):47–59. (In Russ.) DOI: 10.17586/2713-1874-2024-3-47-59

5. Buryi A.S., Tsaplina O.S. Agent-based models for decision-making using generative artificial intelligence. *Legal informatics*. 2025;(1):101–109. (In Russ.) DOI: 10.24412/1994-1404-2025-1-101-109
6. Sinyakova E.A. Strategies for AI implementation in local newsrooms: typology and organizational context. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 10. Zhurnalistika = Lomonosov Journalism Journal*. 2025;(6):80–113. (In Russ.) DOI: 10.55959/msu.vestnik.journ.6.2025.80113
7. Davydov S.G., Zamkov A.V., Krasheninnikova M.A., Lukina M.M. The use of artificial intelligence technologies in Russian media and journalism. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 10. Zhurnalistika = Lomonosov Journalism Journal*. 2023;(5):3–21. (In Russ.) DOI: 10.30547/vestnik.journ.5.2023.321
8. Zuykina K.L., Razumova D.V. Artificial intelligence in Russian mass media: instruments, problems, and threats. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 10. Zhurnalistika = Lomonosov Journalism Journal*. 2025;(5):79–103. (In Russ.) DOI: 10.55959/msu.vestnik.journ.5.2025.79103
9. Velasquez M., Hester P.T. An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. *International Journal of Operations Research*. 2013;10(2):56–66.
10. Ishizaka A., Nemery P. *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software*. Chichester, John Wiley & Sons, 2013. DOI: 10.1002/9781118644898
11. Saaty T.L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*. 2008;1(1):83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590
12. Tyree J., Akerman A. Architecture Decisions: Demystifying Architecture. *IEEE Software*. 2005;22(2):19–27. DOI: 10.1109/MS.2005.27
13. Jansen A., Bosch J. Software Architecture as a Set of Architectural Design Decisions. In: *Proceedings of the 5th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture*. 2005. P. 109–120. DOI: 10.1109/WICSA.2005.61
14. VladSpace. *Kak ya postroil Graph RAG sistemu s tochnost'yu 96.7% za 5 dney: ot nauchnykh statey do production-ready payplayna* [How I Built a Graph RAG System with 96.7% Accuracy in 5 Days: From Research Papers to a Production-Ready Pipeline]. *Habr*. February 24, 2026. (In Russ.) Available at: <https://habr.com/ru/articles/1003064/> (accessed April 23, 2026).
15. Schick T., Dwivedi-Yu J., Dessi R., Raileanu R., Lomeli M., Zettlemoyer L., Cancedda N., Scialom T. Toolformer: Language Models Can Teach Themselves to Use Tools. *ArXiv preprint: arXiv:2302.04761*. 2023.
16. Yao S., Zhao J., Yu D., Du N., Shafran I., Narasimhan K., Cao Y. ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models. *ArXiv preprint: arXiv:2210.03629*. 2022.
17. Liang P., Bommasani R., Lee T., Tsipras D., Soylu D., Yasunaga M., Zhang Y., Narayanan D., Wu Y., Kumar A. et al. Holistic Evaluation of Language Models. *ArXiv preprint: arXiv:2211.09110*. 2022.

Информация об авторах

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

Голлай Александр Владимирович, д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gollaiav@susu.ru.

Браженко Сергей Александрович, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; bsa@uralto.ru.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Alexander V. Hollay, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gollaiav@susu.ru.

Sergey A. Brazhenko, Postgraduate Student of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; bsa@uralto.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 23.04.2026

The article was submitted 23.04.2026

ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ВОДИТЕЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А.Г. Лютов, lutov1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6048-8816>

М.Б. Новоженин, novozhenin.maxim@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9157-9991>

А.А. Хелимский, khelimskiy.ams436@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6417-1181>

Х.А. Оливера Захаров, joseolivera@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7094-3445>

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация. Задача эффективного, надежного и безопасного управления транспортным средством с различной степенью автономности требует комплексного решения, при котором необходима оценка состояния как самого транспортного средства, так и взаимодействие его с окружающей средой и особенно взаимодействие непосредственно с водителем. В последнее время в научных исследованиях представлено множество различных подходов к оценке состояния водителя транспортного средства, которые отличаются большим разнообразием. На фоне большого различия в алгоритмах, средствах и качестве получаемых данных формируется задача качественного и своевременного определения состояния водителя. В статье представлен обзор и анализ зарубежной литературы, освещающей последние достижения в вопросе определения состояния водителя транспортного средства. Развитие систем контроля состояния – driver monitor system (DMS) – направлено на применение гибридных, мультимодальных и вычислительно эффективных решений, способных обеспечить своевременное и надёжное обнаружение сонливости и невнимательности, при этом оставаясь комфортными и приемлемыми для массового использования. **Цель исследования:** анализ основных текущих тенденций развития и модернизации как классических методов оценки состояния водителя (инвазивных и неинвазивных методов), так и подходов на базе методов и средств искусственного интеллекта. **Материалы и методы.** Для проведения исследования были использованы базы международных научных журналов, отражающих направления исследований зарубежных авторов в области DMS. **Результаты.** По результатам проведённого обзора выделены методы, имеющие наилучшую применимость в процессе отслеживания состояния водителя, исследованы современные и перспективные направления развития технологий мониторинга водителя, подходы и методы, применяемые для оценки внимания водителя, обнаружения сонливости. Совместное использование алгоритмов глубокого обучения, возможностей обработки в реальном времени и передовых сенсорных технологий создает беспрецедентные возможности для повышения безопасности транспортного средства через интеллектуальные системы мониторинга. **Заключение.** Использование методов неинвазивного определения состояния водителя в совокупности с современными подходами на основе интеллектуальных технологий позволят сформировать эффективный инструментальный для надежного и безопасного управления транспортным средством.

Ключевые слова: транспортное средство, состояние водителя, система отслеживания, интеллектуальные подходы

Для цитирования: Обзор зарубежных исследований в области интеллектуальных подходов к оценке состояния водителя транспортных средств / А.Г. Лютов, М.Б. Новоженин, А.А. Хелимский, Х.А. Оливера Захаров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 3. С. 16–25. DOI: 10.14529/ctcr260302

REVIEW OF FOREIGN RESEARCH IN THE FIELD OF INTELLIGENT APPROACHES TO ASSESSING THE CONDITION OF THE DRIVER OF VEHICLES

A.G. Lutov, lutov1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6048-8816>

M.B. Novozhenin, novozhenin.maxim@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9157-9991>

A.A. Khelimskii, khelimskiy.ams436@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6417-1181>

K.A. Olivera Zakharov, joseolivera@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7094-3445>

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract. The task of effective, reliable and safe vehicle control with varying degrees of autonomy requires a comprehensive solution, which requires an assessment of the condition of both the vehicle itself and its interaction with the environment, and especially interaction directly with the driver. Recently, there have been many different approaches to assessing the condition of a vehicle driver, which are very diverse. Given the significant disparities of a large difference in algorithms, tools and the quality of the data received, the task of high-quality and timely determination of the driver's condition is being formed. The article provides an overview and analysis of foreign literature highlighting the latest achievements in determining the condition of a vehicle driver. Development of a driver monitoring system (DMS) aims to applying the hybrid, multimodal and computationally efficient solutions, that ensure timely and reliable detection of drowsiness and inattention, while staying comfortable and acceptable for mass use. **The purpose of the study.** To analyze the main current trends in the development and modernization of both classical methods of assessing the condition of the driver (invasive and non-invasive methods) and approaches based on artificial intelligence. **Materials and methods.** The databases of international scientific journals were used for the research in DMS. **Results.** Based on the results of the review, the methods that have the best applicability in the process of tracking the driver's condition have been identified. Were studied promising directions in the development of driver monitoring technologies, as well as approaches and methods applied for driver attention assessment and drowsiness detection. The combined use of deep learning algorithms, real-time processing capabilities, and advanced sensor technologies creates unprecedented opportunities to enhance vehicle safety through intelligent monitoring systems. **Conclusion.** The use of non-invasive methods for determining the driver's condition in combination with modern approaches based on intelligent technologies will make it possible to form effective tools for reliable and safe vehicle management.

Keywords: vehicle, driver's condition, tracking system, intelligent approaches

For citation: Lutov A.G., Novozhenin M.B., Khelimskii A.A., Olivera Zakharov K.A. Review of foreign research in the field of intelligent approaches to assessing the condition of the driver of vehicles. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2026;26(3):16–25. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260302

Введение

Эволюция технологий обеспечения безопасности транспортных средств (ТС) достигла переломного момента, когда интеграция искусственного интеллекта, компьютерного зрения и систем мониторинга в реальном времени меняет ландшафт применяемых средств и возможностей автономного вождения. По мере перехода от традиционных ТС, управляемых человеком, к все более автоматизированным системам критическая важность Driver Monitoring Systems (DMS) стала первостепенной для обеспечения безопасности дорожного движения и оптимизации интерфейса человек-машина [1, 2].

Предварительные замечания

В современных системах мониторинга состояния водителя чаще всего применяется комплексный подход. В состав комплекса могут входить физиологические, автомобильные (поведение ТС) и визуальные (поведенческие) методы.

Физиологические методы остаются наиболее точными, однако их инвазивный подход усложняет практическое применение в реальных условиях вождения. «Золотым стандартом» можно назвать метод электроэнцефалограммы (ЭЭГ), использующий шлемы, гарнитуры, нагрудные

датчики и периокулярные электроды для регистрации активности головного мозга. Ключевыми параметрами данного метода являются спектральные мощности альфа-, тета-, бета- и дельта-ритмов, а также расчетные показатели – индекс сонливости и отношение альфа/тета. Для отслеживания глаз с помощью электродов, размещаемых вокруг глазниц, применяется метод электроокулографии (ЭОГ), регистрирующий медленные движения глаз, характерные для оценки сонливости/усталости водителя. Существует метод, свойства которого коррелируют с уровнем усталости, используя нагрудные датчики. Этим методом является электрокардиография (ЭКГ), измеряющая вариабельность сердечного ритма. Однако недостаток данного метода заключается в том, что метод обладает высокой диагностической ценностью и требует постоянного контакта с кожей, дорогостоящим оборудованием, а обработка сигналов сопряжена со сложным спектральным анализом и необходимостью фильтрации артефактов движения.

Автомобильные методы используют данные штатных систем автомобиля: камеры, лидары, инерциальные измерительные блоки, датчики угла поворота рулевого колеса, датчики педалей и т. п., и являются наименее инвазивными. К основным измеряемым параметрам относятся: угол поворота рулевого колеса, положения в полосе движения, резкость манёвров, а также характер использования тормозной системы и педали акселератора. Главными преимуществами являются низкая стоимость и простота интеграции, однако изменения в вождении могут быть вызваны не только сонливостью водителя, но и дорожными условиями, отвлечением внимания, стилем вождения.

Данные методы, основанные на компьютерном зрении, в настоящее время являются наиболее актуальными. Для захвата данных используются как камеры видимого диапазона, так и инфракрасные, включая те же камеры смартфонов. К основным измеряемым параметрам относятся: состояния глаз PERCLOS – процент закрытия глаз, частота и скорость моргания, направление взгляда, положение и поворот головы, состояние рта (продолжительность и частота зевков).

Несмотря на большое число самих методов, стоит помнить, что все эти методы сталкиваются со значительными сложностями обработки, включая необходимость обеспечения устойчивости к изменениям освещенности, ракурса, наличия очков или бороды, а также высокие вычислительные затраты и потребность в больших размеченных наборах данных для обучения моделей.

Анализ физиологических сигналов представляет собой один из наиболее прямых подходов к обнаружению сонливости, мониторинг биологических индикаторов, таких как вариабельность сердечного ритма, проводимость кожи и паттерны мозговых волн. Эти методы обеспечивают объективные измерения изменений физиологического состояния, связанных с усталостью и сонливостью.

Мониторинг электроэнцефалографии (EEG) может обнаруживать характерные паттерны мозговых волн, связанные с началом сонливости, в то время как анализ вариабельности сердечного ритма идентифицирует изменения автономной нервной системы, которые предшествуют эпизодам сна.

Однако данные подходы, как правило, требуют прямого физического контакта с пользователем, к примеру, через датчики на коже или головные электроды, что может снижать комфорт, ограничивать свободу движений и затруднять практическое применение в условиях реального вождения. К тому же датчики нуждаются в постоянной калибровке и являются чувствительными к малейшим движениям, что может привести к получению неточных данных [3].

Подходы на основе Deep Neural Networks и Convolutional Neural Networks

В статье [3] представлен всесторонний обзор методов обнаружения сонливости и усталости у водителей с помощью машинного обучения (МО) и глубокого обучения (ГО). Современные методы для этого применения делятся на четыре категории: анализ изображений или видео во время вождения, анализ биологических сигналов водителей, анализ движения ТС и гибридные методы.

В работе [4] на трёх основных общедоступных наборах данных – NTHUDDD, YawDD и UTA-RLDD, – которые широко используются в исследованиях по выявлению сонливости, были рассмотрены такие методы, как метод k-ближайших соседей (KNN), метод опорных векторов (SVM), свёрточные нейронные сети (CNN) и передовые модели компьютерного зрения (CV), такие как YOLOv5, YOLOv8 и Faster R-CNN.

Кроме двухэтапных детекторов (таких как R-CNN и его производные), которые сначала генерируют регионы интереса, а затем классифицируют их, YOLO реализует одноэтапную детекцию. Преимущества по сравнению с другими сетями заключается в способности обрабатывать изображения в реальном времени [5]. Архитектура YOLO оптимизирована для сквозного обучения (end-to-end learning). YOLO «видит» все изображение целиком. Использование YOLO в большинстве случаев является предпочтительным, если не оговорены требования более высокой производительности.

В работе [6] использованы модели глубокого обучения, такие как традиционный CNN, VGG16 и MobileNet, которые облегчили обнаружение сонливости. Среди этих подходов модель MobileNet стала ценным выбором для обнаружения сонливости водителей благодаря возможности обработки данных в режиме реального времени и пригодности для развертывания в условиях ограниченных ресурсов с наивысшей достигнутой точностью – 92,75 %.

Методы определения зоны внимания водителя

Для лучшего контроля внимания водителя необходимо предполагать, куда смотрят водители, создавая пространственные тепловые карты, но и учитывать когнитивные мотивы, лежащие в основе распределения внимания в конкретных ситуациях, что обеспечивает более глубокое понимание механизмов внимания. В работе [7] представлена Explainable Driver Attention Prediction – новая парадигма задач, которая одновременно предсказывает области пространственного внимания (куда), анализирует семантику внимания (что) и предоставляет когнитивные обоснования распределения внимания (почему).

Определение зон внимания водителя опирается на сложные технологии отслеживания глаз и позиционирования головы, которые могут точно оценить, куда водитель направляет свое визуальное внимание. Эти системы должны учитывать индивидуальные вариации в структуре лица, положении сидения и поведенческих паттернах [8–11].

Основные методы обнаружения зон внимания включают отслеживание роговичного отражения, оценку центра зрачка и алгоритмы оценки позы головы. Эти техники работают в комбинации для создания точных моделей направления и продолжительности визуального внимания. Передовые системы включают возможности прогнозного моделирования, которые могут предвидеть сдвиги внимания на основе контекста вождения, дорожных условий и исторических поведенческих паттернов, обеспечивая проактивные вмешательства в области безопасности [12, 13].

Методы определения сонливости у водителей

В работе [14] представлена модель MTCNN (multi-task cascaded convolutional network, многозадачная каскадная свёрточная сеть), на основе свёрточных нейронных сетей, которая распознает пять лицевых ориентиров и определяет их местоположение в реальном времени. Три подсети, входящие в состав модели, используют построенную пирамиду изображений в качестве входных данных. Далее строятся прямоугольники, ограничивающие глаза и губы для каждого из наблюдаемых. В прямоугольниках наблюдаются такие признаки, как частое моргание, длительное закрытие глаз, зевота.

В работе [15] предлагается не учитывать данные о рулевом управлении и скорости ТС. Предлагается использовать одну камеру для анализа состояния водителя. Чтобы определить невнимательность водителя, система запускает процесс оценки положения головы. Определяется покачивание головой из стороны в сторону или постоянное кивание, а также признаки того, что водитель сосредоточен на дороге, по положению головы, когда руль неподвижен. Преимуществом такого метода является то, что не требуется выделение лицевых ориентиров, но появляются ограничения при соотношении текущего состояния с уже изученными классами. В данной работе предполагается использовать инфракрасную камеру.

В работе [16] по выражению лица водителя выполняется поиск признаков. В качестве инструментов используются глубокие НС. Были выделены биологические, автомобильные и гибридные подходы оценки работоспособности. Ассоциации сформированы по физиологическим и поведенческим паттернам. В работе представлено сравнение архитектуры трансформаторов ViT и Swin и НС. Трансформеры выполняют распознавание сонливости благодаря способности моделировать взаимосвязи между удалёнными областями лица (например, корреляцию между

зевотой и длительным закрыванием глаз) с помощью механизма самовнимания. Это отличает их от свёрточных нейронных сетей, которым для достижения аналогичной контекстной осведомлённости требуются более глубокие архитектуры, часто в ущерб вычислительной эффективности.

В статье [17] указано, что сонливость, связанная с недосыпанием и нарушением циркадных ритмов, является фактором риска несчастных случаев и человеческих ошибок. Процент времени, в течение которого глаза закрыты более чем на 80 % (PERCLOS), является одним из наиболее достоверных показателей, используемых для пассивного выявления сонливости, которая усиливается при недосыпании, частичном ограничении сна, в ночное время и при других действиях, вызывающих сонливость, во время тестов на бдительность, имитации вождения и вождения на дорогах.

Дистанционная фотоплетизмография, или gPPG, представляет собой неинвазивную и бесконтактную оптическую методику, позволяющую удаленно измерять жизненно важные показатели, включая частоту сердечных сокращений (ЧСС) и частоту дыхания (ЧД), с использованием стандартной видеокамеры. В исследовании Allado и соавт. [18] PPG-сигналы для ЧД извлекались из области, охватывающей движение грудной клетки (нижняя часть кадра под лицом), в то время как сигналы ЧСС извлекались из области лба. Для обеспечения точности обработки сигнала система настроена на отклонение любой частоты, выходящей за пределы физиологического диапазона от 6 до 48 циклов в минуту (cpm).

Использование машинного обучения в качестве анализатора представлено в работе [19]. Входными данными являются признаки, извлеченные из физиологических данных, и данные датчиков глаз, на выходе определялось, будет ли захват (перехватывание управления, возвращение к управлению в результате отвлечения) успешным. Входные признаки представлены следующим набором: ЭКГ (поле, значение, в файле ECG.csv), PPG (поле, значение, в файле PPG.csv), EDA (поле, значение, в файле EDA.csv), HR (поле, значение, в формате HR.csv), диаметр зрачка (поле, значение, в формате diameter.csv), пристальный взгляд (поля, угол взгляда, gazeAngleX и gazeAngleY, в формате gazePositions.csv), фиксация взгляда (поля, угол фиксации, fixationAngleX, fixationAngleY, продолжительность и дисперсия, в формате fixations.csv).

В части работ предлагается использовать модернизированный нейросетевой инструментарий. Интеллектуальная сетевая платформа для мониторинга отвлечения внимания водителя на основе RES-SE-CNN представлена в работе [20]. По структуре это остаточная НС – НС сжатия и возбуждения – сверточная НС. Такая сеть занимает меньше пространства.

В работе [21] основным отличием является исследование различной степени освещения при исследовании параметров в видимом и инфракрасных диапазонах на точность прогноза. Результаты показывают, что мультимодальная модель обнаружения усталости при вождении работает лучше, чем одномодальная, а точность повышается на 8,1 %. При аномальном освещении, например, при ярком или слабом свете, точность метода может достигать 91,7 % при максимальном освещении и 83,6 % – при минимальном. При нормальном освещении точность может достигать 93,2 %.

Использование данных недосыпа приведено в работе [22]. В условиях недосыпа собран набор данных, включающий физиологические и лицевые данные. Но основной отличительной чертой работы является мультимодальная модель с объединёнными признаками, которая объединяет различные типы данных, такие как электроэнцефалограммы (ЭЭГ), электрокардиограммы (ЭКГ) и изображения лиц, с помощью сложного механизма объединения. Признаки из разных модальностей не просто комбинируются, а служат взаимными весами, влияющими на вклад друг друга в конечный прогноз.

Особое внимание тактильным сигналам (haptics) уделено в работе [23]. Автоматизированная система вождения использует прогнозирование целевого угла поворота водителя (на основе модели водителя и тактильного ввода), прогнозирование траектории (адаптация маршрута с учётом намерений водителя) и прогноз импеданса водителя (с помощью расширенного фильтра Калмана (EKF)).

В работе [24] был проведен систематический обзор результатов по чувствительности и специфичности. Результаты исследований, в которых применялся только один физиологический метод (моносигнальный подход), значительно различались, в то время как в исследованиях, в кото-

рых использовался многосигнальный подход с использованием нескольких физиологических сигналов, привел к большей согласованности и более высоким результатам как по показателям чувствительности, так и по показателям специфичности.

Работа [25] способствует выявлению сонливости у водителей с помощью машинного обучения, применяемого исключительно к физиологическим данным, собранным с помощью неинвазивной системы, которую можно установить в виде носимого на запястье датчика. Для проверки точности и осуществимости проекта результаты сравниваются с эталонными данными, полученными с помощью медицинского устройства для снятия ЭКГ. В пользовательских и независимых тестах применялось несколько алгоритмов машинного обучения для бинарной классификации. Результаты свидетельствуют о том, что неинтрузивная настройка обеспечивает такую же точность, как и устройство медицинского класса, а также позволяет достичь высокой точности (> 92 %) особенно в сценариях, зависящих от пользователя.

Методы отслеживания зрачка

В статье [26] представлен обзор функций машинного обучения, получаемых из данных айтрекинга для задачи классификации.

В статье [27] рассказано, как анализ поведения водителей с помощью отслеживания движений глаз позволяет оценить качество инфраструктуры с точки зрения безопасности дорожного движения. Анализ поведения водителей проводился в городских районах с изучением объектов наблюдения (автомобилей, пешеходов, дорожных знаков, отвлекающих элементов) в количественном выражении (время фиксации на каждом отдельном объекте). В частности, были изучены кольцевые перекрестки и прямолинейные участки городских магистралей, а также собраны данные о поведении семи водителей, чтобы обеспечить значительную статистическую вариативность.

В работе [28] представлен обзор популярных методов, основанных на анализе внешнего вида и основанных на характеристиках, а также использовании решений на моделях, в том числе и гибридных.

В работе [29] представлен видеоокуляр, который сохраняет каждый видеокادر в виде изображения с полным разрешением (MJPEG). Изображения можно обрабатывать в автономном режиме для определения характеристик глаза, в том числе положения зрачка и отражения роговицы. Можно провести сравнение нескольких алгоритмов определения положения зрачка и отражения роговицы.

В статье [26] провели систематический обзор литературы, охватывающий исследования по айтрекингу в области классификации, опубликованные с 2016 по 2022 год. В статьях представлено, что из данных айтрекинга можно извлечь следующие характеристики: размер зрачка, саккады, фиксации, скорость, моргание, положение зрачка, электроокулограмма (ЭОГ) и точка взгляда. Фиксация была наиболее часто используемой характеристикой в найденных исследованиях.

В статье [30] представлена автоматизированная система на основе машинного зрения для прогнозирования сонливости или усталости водителя в режиме реального времени. В ней используются различные визуальные характеристики глаз, такие как закрытие глаз, форма бровей, моргание и другие чётко определённые геометрические черты лица, в качестве надёжных индикаторов сонливости водителя. Кроме того, применяется эффективная схема извлечения локальных признаков Габора из изображений водителей на основе квантовой информации Фишера. Затем на основе извлечённых признаков создаётся новый дескриптор Фишера – Габора (FGD), который инвариантен к масштабу и повороту, а также устойчив к изменениям освещения, шума и незначительным изменениям ракурса. Нормализованные FGD в конечном счёте подаются в скрытое динамическое условное случайное поле (LDCRF) – классификационная модель, позволяющая определить, является ли водитель сонливым / утомленным, – и при необходимости выдают предупреждающий сигнал. Серия интенсивных экспериментов, проведенных с использованием эталонного набора видеоданных NTHU-DDD, показывает, что предлагаемая система может прогнозировать сонливость или утомление водителя эффективнее и результативнее, превосходя несколько самых современных аналогов, достигая конкурентоспособной точности обнаружения в 97,6% при сохранении строгих гарантий в режиме реального времени.

Использование инфракрасной камеры

В новейших методах выявления усталости водителя есть две проблемы: во-первых, мономодальная информация не может точно отражать фактическое состояние водителя на разных стадиях усталости, а во-вторых, эффект выявления не очень хорош или его вообще трудно добиться при аномальном освещении. В статье [21] рассматриваются многозадачные каскадные свёрточные сети (MTCNN) и теория дистанционной фотоплетизмографии на основе инфракрасного излучения (rPPG) используется для извлечения информации о лице и физиологическом состоянии водителя. На основе мультимодальной информации об усталости водителя строится модель объединения мультимодальных признаков для комплексного анализа тенденций изменения уровня усталости водителя. Чтобы повысить точность обнаружения при аномальном освещении, мультимодальные признаки, извлечённые из изображений в видимом и инфракрасном диапазонах, объединяются с помощью модуля реконструкции с несколькими потерями (MLR), а также создаётся модуль обнаружения усталости водителя, основанный на модели Bi-LSTM и использующий данные о времени усталости. Эксперименты были проведены при различном освещении и на наборах данных NTHU-DDD, UTA-RLDDD и FAND. Результаты показывают, что мультимодальная модель обнаружения усталости водителя работает лучше, демонстрирует более высокую производительность, чем одномодальная модель, а точность повышается на 8,1 %. При аномальном освещении, например, при ярком или слабом свете, точность метода может достигать 91,7 % при максимальном освещении и 83,6 % – при минимальном. При нормальном освещении точность может достигать 93,2 %.

Использование лицевой маски и лицевых ориентиров (face alignment)

Способность людей определять положение головы по форме лица и наоборот указывает на сильную корреляцию между ними. В недавних исследованиях по выравниванию лиц информация о положении головы использовалась для прогнозирования ориентиров на лице в задачах компьютерного зрения. Однако во многих исследованиях информация о положении головы использовалась в основном для инициализации средних ориентиров, поскольку она не может отображать детализированную форму лица. Чтобы повысить эффективность выравнивания лиц за счёт эффективного использования информации о положении головы, в статье [31] предлагается новый подход, который интегрирует информацию о положении головы в карты признаков сети выравнивания лиц, а не просто использует её для инициализации ориентиров на лице. Кроме того, предложенная структура сети обеспечивает надёжное выравнивание лиц с помощью двумерной сети. Эта структура использует многомерные функции, такие как двумерные карты признаков и трёхмерная тепловая карта, чтобы снизить зависимость от одного типа карт признаков и обогатить информацию о признаках. Также в работе предлагается метод плотного выравнивания лиц с помощью дополнительного полносвязного слоя в конце двумерной сети, обученной с использованием разреженного выравнивания лиц.

Отслеживание температуры кожи лица

Оценка физиологического и психологического состояния с помощью тепловизионных изображений основана на измерении температуры кожи в определённых областях, таких как нос, рот и щёки. Для определения температуры кожи в интересующей области необходимо выровнять лицо на тепловизионном изображении. На сегодняшний день для выравнивания лица на тепловизионных изображениях используется модель активного внешнего вида (Active Appearance Model, AAM). Однако вычисления с использованием этого метода требуют больших затрат и выполняются медленно. С другой стороны, сообщалось, что выравнивание лиц на видимых изображениях с помощью каскадной регрессии формы (Cascaded Shape Regression, CSR) обеспечивает высокую производительность в режиме реального времени. Однако исследований по выравниванию лиц на тепловизионных изображениях с помощью CSR не проводилось. В исследовании [32] была проверена скорость и надёжность выравнивания лиц на тепловизионных изображениях с помощью CSR. Результаты показывают, что выравнивание лиц с помощью CSR более надёжно и требует меньше вычислительных ресурсов, чем AAM.

Чтобы устранить расхождения в знаниях между разными наборами данных и обучить универсальную систему выравнивания лиц (TUFA), не зависящую от задачи, в статье [33] представлена стратегия объединения знаний из нескольких наборов данных. В частности, мы вычисляем

среднюю форму лица для каждого набора данных. Чтобы явно сопоставить эти усреднённые формы с интерпретируемой плоскостью на основе их семантики, каждая форма объединяется с группой семантических выравнивающих вложений. Двумерные координаты этих выровненных форм можно рассматривать как привязки к плоскости. Закодировав их в структурных подсказках и выполнив дальнейшую регрессию соответствующих ориентиров лица с использованием признаков изображения, устанавливаем соответствие между плоскостью и целевыми лицами, что унифицирует цель обучения для разных наборов данных.

Заключение

Рассмотренные методы и алгоритмы, которые излагаются в зарубежной литературе, представляют большой интерес. В обзоре показано, что современные системы мониторинга представляют собой мультидисциплинарную область, в которой пересекаются компьютерное зрение, глубокие нейросети и физиологический мониторинг. Объединение подходов – визуальных (отслеживание взгляда, позы головы, PERCLOS), физиологических (ЭЭГ, ЭКГ, rPPG) и автомобильных (поведенческие параметры ТС) – обеспечивает более надежную и устойчивую оценку состояния водителя, чем любой отдельный метод. Свёрточные сети (CNN), лёгкие архитектуры для встраиваемых систем (MobileNet), одноэтапные детекторы в реальном времени (YOLOv5/YOLOv8), а также трансформеры (ViT, Swin) показали высокую эффективность в задачах детекции лица, анализа выражений и распознавания признаков сонливости; трансформеры особенно полезны для моделирования глобальных взаимосвязей между зонами лица. Мультимодальные и гибридные модели, объединяющие визуальные и физиологические данные, демонстрируют устойчивый выигрыш в точности (примерно на уровне +8 % по сравнению с одномодальными решениями в ряде работ) и лучшие показатели чувствительности/специфичности при обнаружении усталости.

В то же время физиологические методы (ЭЭГ, ЭКГ, ЭОГ) остаются «золотым стандартом» по информативности, но их инвазивность, необходимость калибровки и чувствительность к артефактам ограничивают практическую применимость в массовых условиях. Бесконтактные методы – rPPG, инфракрасная и видимая камера, отслеживание взгляда и позы – предлагают приемлемый компромисс между удобством и точностью, особенно в сочетании с эффективными алгоритмами фильтрации и предобработки сигналов. Реализация мониторинга в реальном времени и адаптация к условиям освещения (видимый / ИК-диапазоны) остаются ключевыми инженерными задачами.

Таким образом, ключевые направления дальнейших исследований и развития DMS: усиленная интеграция мультимодальных данных с продвинутыми механизмами слияния признаков; оптимизация архитектур (легковесные трансформеры, RES-SE-CNN и др.) для встраиваемых и ресурсно-ограниченных платформ; повышение устойчивости к вариациям освещения и движениям водителя; улучшение удобства и неконтактности физиологических измерений (rPPG, сенсоры в салоне); разработка объяснимых моделей внимания (Explainable Driver Attention) для интерпретируемых и безопасных вмешательств HMI.

В целом эволюция DMS идёт в сторону гибридных, мультимодальных и вычислительно эффективных решений, способных обеспечить своевременное и надёжное обнаружение сонливости и невнимательности, при этом остающихся комфортными и приемлемыми для массового использования.

Список литературы/References

1. Zhang Y., Owechko Y., Zhang J. Driver cognitive workload estimation: A data-driven perspective. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. 2004. P. 642–647. DOI: 10.1109/ITSC.2004.1398976
2. Flores M.J., Armingol J.M., de la Escalera A. Driver drowsiness detection system under infrared illumination for an intelligent vehicle. *IET Intelligent Transport Systems*. 2011;5(3):241–251. DOI: 10.1049/iet-its.2009.0090
3. Abd El-Nabi S.A., El-Shafai W.A., El-Rabaie E.S., Ramadan K., Abd El-Samie F.E., Mohsen S. Machine learning and deep learning techniques for driver fatigue and drowsiness detection: a review. *Multimedia Tools and Applications*. 2023;83(27):30813–30849. DOI: 10.1007/s11042-023-15054-0
4. Essahraoui S., Lamaakal I., El Hamly I., Yassine M., Ouahbi I., El Makkaoui K., Filali Bouami M., Pławiak P., Alfarraj O., Abd El-Latif A. Real-Time Driver Drowsiness Detection Using Facial Analysis and Machine Learning Techniques. *Sensors*. 2025;25(3):812. DOI: 10.3390/s25030812

5. Lightly AI. YOLO: blog [Electronic resource]. *Lightly AI*. Available at: <https://www.lightly.ai/blog/yolo> (accessed 10.12.2025).
6. Delwar T.S., Singh M., Mukhopadhyay S., Kumar A., Parashar D., Lee Y., Rahman M.H., Sejan M.A.S., Ryu J.Y. AI- and Deep Learning-Powered Driver Drowsiness Detection Method Using Facial Analysis. *Applied Sciences*. 2025;15(3):1102. DOI: 10.3390/app15031102
7. Zhou Y., Tang J., Xiao X., Lin Y., Liu L., Guo Z., Fei H., Xia X., Gou C. Where, What, Why: Towards Explainable Driver Attention Prediction. *ICCV2025 Highlight*. 2025; arXiv:2506.23088. DOI: 10.48550/arXiv.2506.23088
8. Fridman L., Lee J., Reimer B., Victor T. “Owl” and “Lizard”: Patterns of Head Pose and Eye Pose in Driver Gaze Classification. *IET Computer Vision*. 2016;10(4):308–314. DOI: 10.1049/iet-cvi.2015.0296.
9. Vicente F., Huang Z., Xiong X., Torre F.D., Zhang W., Levi D. Driver Gaze Tracking and Eyes Off the Road Detection System. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2015;16(4):2014–2027. DOI: 10.1109/TITS.2015.2396031
10. Sesma-Sanchez L., Villanueva A., Cabeza R. Evaluation of pupil center-eye corner vector for gaze estimation using a web cam. In: *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications*. 2012. P. 217–220. DOI: 10.1145/2168556.2168598
11. Valenti R., Sebe N., Gevers T. Combining Head Pose and Eye Location Information for Gaze Estimation. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2012; 21(2):802–815. DOI: 10.1109/TIP.2011.2162740
12. Kar A., Corcoran P. A Review and Analysis of Eye-Gaze Estimation Systems, Algorithms and Performance Evaluation Methods in Consumer Platforms. *IEEE Access*. 2017;5:16495–16519. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2735633
13. Krafka K., Khosla A., Kellnhofer P., Kannan H., Bhandarkar S., Matusik W., Torralba A. Eye Tracking for Everyone. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016;2176–2184. DOI: 10.1109/CVPR.2016.239
14. Han Q., Cui S., Min W., Yan C., Liu L., Ning F., Li L. A dense multi-pooling convolutional network for driving fatigue detection. *Scientific Reports*. 2025;15(1):15518. DOI: 10.1038/s41598-025-99441-7
15. Kim D., Park H., Kim T., Kim W., Paik J. Real-time driver monitoring system with facial landmark-based eye closure detection and head pose recognition. *Scientific Reports*. 2023;13(1):18264. DOI: 10.1038/s41598-023-44955-1
16. Hassan O.F., Ibrahim A.F., Gomaa A., Makhlof M.A., Hafiz B. Real-time driver drowsiness detection using transformer architectures: a novel deep learning approach. *Scientific Reports*. 2025;15(1):17493. DOI: 10.1038/s41598-025-02111-x
17. Abe T. PERCLOS-based technologies for detecting drowsiness: current evidence and future directions. *Sleep Advances*. 2023;4(1):zpad006. DOI: 10.1093/sleepadvances/zpad006
18. Allado E., Poussel M., Renno J., Moussu A., Hily O., Temperelli M., Albuissou E., Chenuel B. Remote Photoplethysmography Is an Accurate Method to Remotely Measure Respiratory Rate: A Hospital-Based Trial. *Journal of Clinical Medicine*. 2022;11(13):3647. DOI: 10.3390/jcm11133647
19. Hwang J., Choi W., Lee J., Kim W., Rhim J., Kim A. A Dataset on Takeover during Distracted L2 Automated Driving. *Scientific Data*. 2025;12(1):539. DOI: 10.1038/s41597-025-04781-8
20. Lei J., Ni Z., Peng Z., Hu H., Hong J., Fang X., Yi C., Ren C., Wasaye M.A. An intelligent network framework for driver distraction monitoring based on RES-SE-CNN. *Scientific Reports*. 2025;15(1):6916. DOI: 10.1038/s41598-025-91293-5
21. Hu S., Gao Q., Xie K., Wen C., Zhang W., He J. Efficient detection of driver fatigue state based on all-weather illumination scenarios. *Scientific Reports*. 2024; 14(1):17075. DOI: 10.1038/s41598-024-67131-5
22. Cao S., Feng P., Kang W., Chen Z., Wang B. Optimized driver fatigue detection method using multimodal neural networks. *Scientific Reports*. 2025;15(1):12240. DOI: 10.1038/s41598-025-86709-1
23. Nakade T., Fuchs R., Bleuler H., et al. Haptics based multi-level collaborative steering control for automated driving. *Communications Engineering*. 2023;2:2. DOI: 10.1038/s44172-022-00051-2
24. Watling C.N., Hasan M.M., Larue G.S. Sensitivity and specificity of the driver sleepiness detection methods using physiological signals: A systematic review. *Accident Analysis and Prevention*. 2021;150:105900. DOI: 10.1016/j.aap.2020.105900

25. Kundinger T., Sofra N., Riener A. Assessment of the Potential of Wrist-Worn Wearable Sensors for Driver Drowsiness Detection. *Sensors*. 2020;20(4):1029. DOI: 10.3390/s20041029
26. Lim J.Z., Mountstephens J., Teo J. Eye-Tracking Feature Extraction for Biometric Machine Learning. *Frontiers in Neurorobotics*. 2022;15:796895. DOI: 10.3389/fnbot.2021.796895
27. Vetturi D., Tiboni M., Maternini G., Bonera M. Use of eye tracking device to evaluate the driver's behaviour and the infrastructures quality in relation to road safety. *Transportation Research Procedia*. 2020;45:587–595. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.053
28. Harezlak K., Kasprowski P. Application of eye tracking in medicine: A survey, research issues and challenges. *Computerized Medical Imaging and Graphics*. 2018;65:176–190. DOI: 10.1016/j.compmedimag.2017.04.006
29. Abdulin E., Friedman L., Komogortsev O. Custom Video-Oculography Device and Its Application to Fourth Purkinje Image Detection during Saccades. *ArXiv preprint: arXiv:1904.07361*. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1904.07361
30. Bakheet S., Al-Hamadi A., Alanazi A. An effective approach for real-time drowsy driving prediction using quantized Fisher-Gabor features and latent-dynamic conditional random fields. *Frontiers in Computer Science*. 2025;7:1437084. DOI: 10.3389/fcomp.2025.1437084
31. So J., Han Y. 3D face alignment through fusion of head pose information and features. *Image and Vision Computing*. 2024;151:105253. DOI: 10.1016/j.imavis.2024.105253
32. Nagumo K., Kobayashi T., Oiwa K., Nozawa A. Face Alignment in Thermal Infrared Images Using Cascaded Shape Regression. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(4):1776. DOI: 10.3390/ijerph18041776
33. Xia J., Xu M., Huang W. et al. Mitigating Knowledge Discrepancies among Multiple Datasets for Task-agnostic Unified Face Alignment. *International Journal of Computer Vision*. 2025;133:7985–8005. DOI: 10.1007/s11263-025-02520-5

Информация об авторах

Лютов Алексей Германович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; lutov1@mail.ru.

Новоженин Максим Борисович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; novozhenin.maxim@yandex.ru.

Хелимский Александр Александрович, магистрант кафедры автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; khelimskiy.ams436@mail.ru.

Оливера Захаров Хосе Альберто, аспирант, ассистент кафедры проблем управления, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; joseolivera@mail.ru.

Information about the authors

Alexey G. Lutov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; lutov1@mail.ru.

Maxim B. Novozhenin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; novozhenin.maxim@yandex.ru.

Alexandr A. Khelimskii, Master's student of the Department of Automatic Systems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; khelimskiy.ams436@mail.ru.

Khose Alberto Olivera Zakharov, Postgraduate Student, Assistant of the Department of Control Problems, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; joseolivera@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 11.12.2025

The article was submitted 11.12.2025

Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья

УДК 004.92

DOI: 10.14529/ctcr260303

АЛГОРИТМЫ И JS-КОДЫ РЕШЕНИЯ ПЕРВОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ АНГУЛЯРНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ В Х3D

А.И. Телегин¹, teleginai@susu.ru

Г.И. Волович², g_volovich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>

Е.В. Гусев³, gusev@v@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8458-1222>

В.И. Ширяев³, shiriaevvi@susu.ru

С.Г. Пудовкина¹, pudovkinasg@susu.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе,
Миасс, Россия

² ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия

³ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Целью исследования является разработка алгоритмов и кодов на языке JavaScript (JS) для решения Первой Задачи Динамики (ПЗД) ангулярных Манипуляционных Роботов (МР), моделируемых в расширяемом языке разметки трехмерных виртуальных миров (Х3D). **Методы исследования** относятся к механике Систем Тел (СТ), системному анализу и робототехнике. **Результаты исследования** содержат математические модели для решения ПЗД в виде прямых рекуррентных формул вычисления абсолютных угловых скоростей, ускорений и линейных ускорений полюсов тел МР, обратных рекуррентных формул вычисления главных векторов сил и моментов сил, а также движущих моментов сил, действующих в шарнирных узлах МР. Эти формулы приведены к видам, для численной реализации которых достаточно использовать методы JS-объектов типа SFVec3f и SFRotation, что позволило получить короткие JS-коды вычисления перечисленных величин. Предложены два способа формирования и хранения входных и выходных данных. Первый основан на механизме внешнего Х3D-прототипирования. Во втором данные декларируются в интерфейсной части узла <Script>. Оба способа, а также их различные комбинации позволяют создавать, хранить, дополнять и расширять входные, промежуточные и выходные данные для решения различных задач механики и управления, в частности, для постановки и численного решения ПЗД. На примерах параметризации привода МР и адаптивного ПИД-регулятора Заданных Движений Тел (ЗДТ) описан способ расширения и дополнения входных данных. Для тестирования разработанных JS-кодов использованы известные Уравнения Динамики (УД) СТ с одной и тремя степенями свободы, а также УД динамически уравновешенной системы шести тел. **Заключение.** Полученные результаты используются для Х3D-прототипирования МР в программной системе «СисТел», предназначенной для цифрового моделирования МР, входящих в состав роботизированных технологических комплексов.

Ключевые слова: Х3D, прототипирование, первая задача динамики, параметры Эйлера, уравнения динамики, верификация уравнений динамики, тестирование кода, адаптивный ПИД-регулятор

Для цитирования: Алгоритмы и JS-коды решения первой задачи динамики ангулярных манипуляторов в Х3D / А.И. Телегин, Г.И. Волович, Е.В. Гусев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 3. С. 26–45. DOI: 10.14529/ctcr260303

ALGORITHMS AND JS CODES FOR SOLVING THE FIRST PROBLEM OF DYNAMICS OF ANGULAR MANIPULATORS IN X3D

A.I. Telegin¹, teleginai@susu.ru

G.I. Volovich², g_volovich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>

E.V. Gusev³, gusev@v@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8458-1222>

V.I. Shiriaev³, shiriaevvi@susu.ru

S.G. Pudovkina¹, pudovkinasg@susu.ru

¹ South Ural State University, Miass, Russia

² LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia

³ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The goal is to develop algorithms and codes in JavaScript (JS) to solve the First Dynamic Problem (FDP) of angular Manipulation Robots (MR), modeled in an extensible markup language for three-dimensional virtual worlds (X3D). The research methods relate to the mechanics of Body Systems (BS), system analysis and robotics. The results of the study contain mathematical models for solving the FDP in the form of direct recurrent formulas for calculating the absolute angular velocities, accelerations and linear accelerations of the poles of MR bodies, inverse recurrent formulas for calculating the main vectors of forces and moments of forces, as well as the driving moments of forces acting in the articulated nodes of MR. These formulas are given the types, for the numerical implementation of which it is sufficient to use the methods of JS objects such as SFVec3f and SFRotation, which made it possible to obtain short JS codes for calculating the listed quantities. Two methods of generating and storing input and output data are proposed. The first one is based on the external X3D prototyping mechanism. In the second case, the data is declared in the interface part of the node <Script>. Both methods, as well as their various combinations, make it possible to create, store, supplement and expand input, intermediate and output data for solving various problems of mechanics and control, in particular, for formulation and numerical solution of FDP. Using examples of parameterization of the MR drive and the adaptive PID controller for Specified Body Movements (SBM), a method for expanding and supplementing input data is described. To test the developed JS codes, the well-known Equations of BS Dynamics (ED) with one and three degrees of freedom, as well as the ED of a dynamically balanced system of six bodies, were used. **Conclusion.** The obtained results are used for X3D prototyping of MR in the “SisTel” software system, designed for digital modeling of MR, which are part of robotic technological complexes.

Keywords: X3D, prototyping, first dynamic problem, Euler parameters, dynamics equations, verification of dynamics equations, code testing, adaptive PID controller

For citation: Telegin A.I., Volovich G.I., Gusev E.V., Shiriaev V.I., Pudovkina S.G. Algorithms and JS codes for solving the first problem of dynamics of angular manipulators in X3D. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(3):26–45. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260303

Введение

В работе используются результаты исследований, опубликованных в статьях [1, 2], и рассматривается решение ПЗД СТ, в которых каждая связанная пара тел имеет (хотя бы одну) общую точку. К классу таких СТ относятся МР.

ПЗД ставится и решается, как правило, для вычисления динамических нагрузок, необходимых для определения прочности и жесткости несущих конструкций, деталей шарнирных узлов, подшипниковых опор и т. д. [3, 4]. Часто ПЗД решается для проверки достаточности мощности приводов, обрабатывающих ЗДТ [5, 6], которые, в свою очередь, вычисляются по целевым движениям рабочих органов МР (схвата с грузом, краскораспылителя, сварочных устройств, сборочного инструмента и т. д.) в процессе решения обратной задачи кинематики. Кроме перечисленных в Программной Системе «СисТел» ПЗД решается с целью верификации различных форм и видов представления УД СТ.

УД в нормальной форме Коши используется для численного интегрирования [7, 8]. УД в регрессионной форме используется для идентификации постоянных параметров МР [9, 10]. УД в форме уравнений Гамильтона используются для поиска первых интегралов и управления [11, 12]. Аналитические виды УД используются в задачах синтеза СТ с заданными свойствами [13]. Конечные и/или рекуррентные виды математических моделей СТ используются как в численных, так и в аналитических исследованиях [13–15]. Линеаризованные (около ЗДТ) виды УД используются для исследования колебаний МР около (вблизи) ЗДТ, определения собственных частот МР и т. д. [16]. УД в форме уравнений Лагранжа второго рода используются для решения задач динамики и управления [3, 5, 6, 10, 15–17].

Таким образом, разработка эффективных методов аналитического и численного решения ПЗД МР является актуальной задачей.

Постановка задачи: разработать математические модели, алгоритмы и JS-коды для вычисления сил и моментов сил, приведенных к полюсам тел МР, т. е. для решения ПЗД МР с использованием объектов SFVec3f и SFRotation. Верифицировать расчетные формулы и протестировать JS-коды численного решения ПЗД.

1. Математические модели, алгоритмы и JS-коды численного решения ПЗД МР

Согласно правилам описания МР (см. первый раздел статьи [1]) с каждым телом МР мысленно связывается Система Координат Тела (СКТ), в которой задаются Постоянные Параметры Тела (ППТ). К ППТ с k -м порядковым номером, т. е. к ППТ(k) относятся:

1) $\bar{R}_k = \overline{O_{k-1}O_k} = R_k^x \bar{x}_{k-1} + R_k^y \bar{y}_{k-1} + R_k^z \bar{z}_{k-1}$ – межполюсный вектор, где R_k^x, R_k^y, R_k^z – относительные координаты полюса тела O_k , т. е. декартовы координаты точки O_k в СКТ($k-1$);

2) m_{ok} – масса k -го тела;

3) $\bar{r}_{ck} = \overline{O_k C_k} = c_k^x \bar{x}_k + c_k^y \bar{y}_k + c_k^z \bar{z}_k$ – вектор центра масс, где C_k – Центр Масс (ЦМ) k -го тела, c_k^x, c_k^y, c_k^z – декартовы координаты ЦМ(k) в СКТ(k) $O_k \bar{x}_k \bar{y}_k \bar{z}_k$;

4) I_{ck} – список Осевых Моментов Инерции (ОМИ) $I_{ck}^x, I_{ck}^y, I_{ck}^z$ в Центральной Системе Координат (ЦСК) k -го тела, где I_{ck}^x – момент инерции k -го тела относительно оси $C_k \bar{x}_k$, I_{ck}^y – момент инерции k -го тела относительно оси $C_k \bar{y}_k$, I_{ck}^z – момент инерции k -го тела относительно оси $C_k \bar{z}_k$;

5) J_{ck} – список Центробежных Моментов Инерции (ЦМИ) $J_{ck}^x, J_{ck}^y, J_{ck}^z$ в ЦСК(k). Из элементов списков I_{ck} и J_{ck} образуется Тензор Инерции k -го Тела (ТИТ(k)) в ЦСК $C_k \bar{x}_k \bar{y}_k \bar{z}_k$, матрица которого имеет следующий вид:

$$I_k^c = \begin{pmatrix} I_{ck}^x & -J_{ck}^x & -J_{ck}^y \\ -J_{ck}^x & I_{ck}^y & -J_{ck}^z \\ -J_{ck}^y & -J_{ck}^z & I_{ck}^z \end{pmatrix},$$

где $k = 1, 2, \dots, N$ – количество подвижных тел МР. В JS-коде решения ПЗД матрица I_k^c представлена векторами $T_{ck}^x = (I_{ck}^x, -J_{ck}^x, -J_{ck}^y)$, $T_{ck}^y = (-J_{ck}^x, I_{ck}^y, -J_{ck}^z)$, $T_{ck}^z = (-J_{ck}^y, -J_{ck}^z, I_{ck}^z)$.

Параметр $\bar{R}_k$ является геометрическим. Модуль вектора $\bar{R}_k$ является длиной $(k-1)$ -го тела и сумма $|\bar{R}_k|$ по k определяет вылет руки МР [1]. Набор параметров $m_{ok}, c_k^x, c_k^y, c_k^z, I_{ck}^x, I_{ck}^y, I_{ck}^z, J_{ck}^x, J_{ck}^y, J_{ck}^z$ описывает Массовые и Инерционные Параметры (МИП) k -го тела.

ППТ и ЗДТ образуют входные данные в ПЗД МР. ЗДТ в текущий момент времени описываются следующими Кинематическими Параметрами Тел (КПТ): $\bar{q}_k$ – Направляющие Косинусы Оси Поворота (НКОП) k -го тела относительно его базы, т. е. $(k-1)$ -го тела; $q_k, \dot{q}_k, \ddot{q}_k$ – относительные угол поворота, угловая скорость и ускорение k -го тела. Из КПТ $\bar{q}_k$ и q_k формируется Параметр Эйлера (ПЭ) k -го тела, задающий поворот СКТ(k) относительно СКТ($k-1$). ПЭ(k) обозначим через Q_k . Отметим, что для k -й Вращательной Кинематической Пары (ВКП) первые три числа ПЭ Q_k , т. е. компоненты орта $\bar{q}_k$, являются постоянными, так как они описывают ориентацию оси вращения k -го тела относительно его базы (предшествующего тела). Четвертое число ПЭ Q_k , т. е. угол поворота q_k , является функцией времени [1, 2].

К выходным данным относятся Полюсные Силовые Факторы (ПСФ), т. е. силы и моменты сил, приведенные к полюсам тел. ПСФ являются решением ПЗД МР.

Условимся через (i,j) ссылаться (обращаться) к формуле под номером j в i-м разделе учебно-го пособия [18]. Наша ближайшая цель – использовать Обратные Рекуррентные Формулы (ОРФ) (4.1), (4.2) для решения ПЗД методами JS-объектов типа SFVec3f и SFRotation, встроенных в ХЗД. Для МР с учетом равенства $\bar{g} = -g\bar{y}$ и обозначений $\ddot{\bar{r}}_k = \ddot{O}\bar{O}_k$, $\bar{m}_{ok} = m_{ok}\bar{r}_{ck}$ ОРФ (4.1), (4.2) вычисления ПСФ принимают вид:

$$\bar{F}_k = m_{ok}(\ddot{\bar{r}}_k + \ddot{\bar{r}}_{ck} + g\bar{y}) + \bar{F}_{k+1}, \quad (1)$$

$$\bar{M}_k = m_{ok}\bar{r}_{ck} \times (\ddot{\bar{r}}_k + \ddot{\bar{r}}_{ck} + g\bar{y}) + \dot{\bar{K}}_{ck} + \bar{R}_{k+1} \times \bar{F}_{k+1} + \bar{M}_{k+1}, \quad (2)$$

где $k = N, N-1, \dots, 1$; $\bar{F}_{N+1} = \bar{M}_{N+1} = 0$,

$$\dot{\bar{K}}_{ck} = I_k^c \cdot \bar{\varepsilon}_k + \bar{\omega}_k \times I_k^c \cdot \bar{\omega}_k, \quad \ddot{\bar{r}}_{ck} = \bar{\varepsilon}_k \times \bar{r}_{ck} + \bar{\omega}_k \times (\bar{\omega}_k \times \bar{r}_{ck}). \quad (3)$$

Вектор $\ddot{\bar{r}}_i$ Абсолютного Ускорения Полюса (АУП) i-го тела вычисляется по Прямой Рекуррентной Формуле (ПРФ)

$$\ddot{\bar{r}}_i = \ddot{\bar{r}}_{i-1} + \bar{\varepsilon}_{i-1} \times \bar{R}_i + \bar{\omega}_{i-1} \times (\bar{\omega}_{i-1} \times \bar{R}_i). \quad (4)$$

Абсолютная Угловая Скорость (АУС) $\bar{\omega}_i$ и Ускорение (АУУ) $\bar{\varepsilon}_i = \dot{\bar{\omega}}_i$ i-го тела вычисляются по ПРФ

$$\bar{\omega}_i = \bar{\omega}_{i-1} + \dot{q}_i \bar{q}_i, \quad \bar{\varepsilon}_i = \bar{\varepsilon}_{i-1} + \ddot{q}_i \bar{q}_i + \dot{q}_i \bar{\omega}_{i-1} \times \bar{q}_i. \quad (5)$$

Здесь $i = 1, 2, \dots, N$, $\ddot{r}_0 = \bar{\omega}_0 = \bar{\varepsilon}_0 = 0$.

Для МР с ВКП, шаровыми и шаровыми с пальцем кинематическими парами формулы (1)–(5) используются для решения следующих задач:

- вычисления ПСФ $\bar{F}_k$ и $\bar{M}_k$ для ЗДТ;
- вычисления сил и моментов сил трения в шарнирах;
- вычисления динамических реакций в подшипниковых опорах ВКП;
- верификации УД МР в различных формах и видах.

Для вычисления Кинематических Функций Тел (КФТ), т. е. проекций на оси $O_i\bar{x}_i$, $O_i\bar{y}_i$, $O_i\bar{z}_i$ СКТ(i) векторов $\bar{y}$, АУС(i) $\bar{\omega}_i$, АУУ(i) $\bar{\varepsilon}_i$ и УПТ(i) $\ddot{\bar{r}}_i$, используются элементы $Y[i]$, $w[i]$, $e[i]$ и $rtt[i]$ списков Y, w, e, rtt. Для решения ПЗД МР в JS-кодах используются следующие глобальные списки входных данных:

```
var R = [], m0 = [], rc = [], Ic = [], Jc = [], // списки ППТ,
    Tx = [], Ty = [], Tz = [], // списки строк матрицы ТИТ,
    Q = [], q = [], qt = [], qtt = [], // списки КПТ,
```

а также следующие списки промежуточных данных:

```
Y = [], w = [], e = [], rtt = [], // списки КФТ
```

и выходных данных:

```
F = [], M = [] // списки ПСФ.
```

В объектно-ориентированном программировании понятия «конструктор», «свойства» и «методы» объекта связаны с описанием характеристик объекта и его поведения. Конструктор используется для создания (инициализации) объекта. Свойства – это параметры объекта, например, проекции вектора или НКОП и угол поворота. Метод – это функция, выполняющая определенные действия. Методы могут менять свойства объекта, взаимодействовать с другими объектами и т. д. Здесь мы используем методы JS-объектов типа SFVec3f и SFRotation.

Объект типа SFVec3f создается конструктором *имяВектора* = new SFVec3f(x, y, z), где x, y, z – свойства вектора "имяВектора", т. е. его проекции на оси выбранной Системы Координат (СК). Отсутствующие свойства автоматически заменяются нулями. Например, $Y = \text{new SFVec3f}(0, 1)$ – орт вертикали, $X = \text{new SFVec3f}(1)$ – орт горизонтали. Мы будем использовать следующие методы векторов: *add(вектор)* – возвращает сумму векторов; *cross(вектор)* – возвращает векторное произведение; *dot(вектор)* – возвращает скалярное произведение; *multiply(число)* – возвращает умножение вектора на число. Например, метод *вектор_1.add(вектор_2)* возвращает сумму векторов "вектор_1" и "вектор_2".

Объект типа SFRotation(x, y, z, angle) описывает ПЭ поворота СК. Свойства x, y, z задают Вектор Оси Поворота (ВОП) и свойство angle задает угол поворота в радианах. ВОП лежит на оси поворота, направлен в положительную сторону оси и имеет произвольную длину. Если длина ВОП равна единице, то компоненты ВОП и НКОП совпадают. ПЭ можно создать, используя конструктор

ПЭ_1 = new SFRotation(x, y, z, angle) или ПЭ_2 = new SFRotation(вектор_1, вектор_2).

Во втором конструкторе оба аргумента – трехмерные векторы. В ПЭ_2 параметры (x, y, z, angle) описывают поворот, переводящий *вектор_1* в *вектор_2*. В процессе конструирования ПЭ Q_k его ВОП автоматически преобразуется в НКОП(k), т. е. в орт оси поворота $\bar{q}_k$.

Здесь используются следующие методы ПЭ: *getAxis()* – возвращает орт оси поворота; *inverse()* – возвращает ПЭ обратного поворота; *multVec(вектор_1)* – возвращает вектор, равный умножению матрицы поворота, заданной через ПЭ, на *вектор_1*.

Если ПЭ Q_i задает поворот СКТ(i) относительно СКТ(i-1) и вычислен $Y[i-1]$, т. е. вектор проекций орта вертикали $\bar{y}$ на оси СКТ(i-1), то, используя метод *inverse()* и *multVec(Y[i-1])*, получим

$$Y[i] = Q[i].inverse().multVec(Y[i-1]).$$

Аналогично из ПРФ $\bar{\omega}_i = \bar{\omega}_{i-1} + \dot{q}_i \bar{q}_i$ вычисления АУС(i) получим следующую программную реализацию вычисления проекций вектора $\bar{\omega}_i$ на оси СКТ(i):

$$w[i] = Q[i].inverse().multVec(w[i-1]).add(Q[i].getAxis().multiply(qt[i])).$$

Здесь учтено, что орт $\bar{q}_i$ представлен в СКТ(i) и метод *getAxis()* возвращает проекции оси поворота $O_i \bar{q}_i$ на оси СКТ(i). Аналогично, используя ПРФ (5) вычисления АУУ(i), получим следующий JS-код вычисления проекций АУУ(i) на оси СКТ(i):

$$e[i] = Q_multVec(e[i-1]).add(qi.multiply(qtt[i])).add(wi.cross(qi).multiply(qt[i])),$$

где $Q_ = Q[i].inverse()$, $qi = Q[i].getAxis()$ и $wi = Q_multVec(w[i-1])$ – проекции АУС(i-1) на оси СКТ(i).

По определению (см. описание ППТ) вектор $\bar{R}_i$ представлен проекциями R_i^x, R_i^y, R_i^z на оси СКТ(i-1). Поэтому с использованием методов сложения векторов (*add*) и векторного произведения (*cross*) правая часть ПРФ (4) имеет следующую программную реализацию:

$$rtt[i-1].add(e[i-1].cross(R[i])).add(w[i-1].cross(w[i-1].cross(R[i]))).$$

Таким образом, JS-код программы вычисления КФТ имеет вид:

Листинг 1. Функция вычислений проекций на оси СКТ орта вертикали, АУС, АУУ и АУП тел

```
function КФТ_MP() {
  Y[0] = new SFVec3f(0, 1); w[0] = new SFVec3f; e[0] = new SFVec3f; rtt[0] = new SFVec3f;
  // Перебор тел MP и программная реализация ПРФ (1)–(4)
  for(var i = 1; i <= N; i++) { i1 = i - 1; Q_ = Q[i].inverse(); qi = Q[i].getAxis();
  Y[i] = Q_.multVec(Y[i1]); // проекции орта вертикали на оси СКТ(i)
  wi = Q_.multVec(w[i1]); w[i] = wi.add(qi.multiply(qt[i]));
  e[i] = Q_.multVec(e[i1]).add(qi.multiply(qtt[i])).add(wi.cross(qi).multiply(qt[i])),
  rtt[i] = Q_.multVec(rtt[i1]).add(e[i1].cross(R[i])).add(w[i1].cross(w[i1].cross(R[i]))); }; }
```

Программная реализация ОРФ (1), (2) с использованием описанных методов представлена в листинге 2. Здесь ТИТ(k) сформирован из списков ОМИ(k) и ЦМИ(k). Вектор Tw содержит результат умножения ТИТ(k) на вектор проекций ($\omega_k^x, \omega_k^y, \omega_k^z$) АУС(k) на оси СКТ(k). Вектор Te содержит результат умножения ТИТ(k) на вектор проекций ($\varepsilon_k^x, \varepsilon_k^y, \varepsilon_k^z$) АУУ(k) на оси СКТ(k).

Листинг 2. Функция вычислений ПСФ по ОРФ (1), (2)

```
function ПСФ_MP() { R[N+1] = new SFVec3f; Q[N+1] = new SFRotation;
  F[N+1] = new SFVec3f; M[N+1] = new SFVec3f;
  for(var k = N; k > 0; k--) {
    // Вычисление по ОРФ (1) главного вектора сил, приведенных к полюсу k-го тела
    Fk = rtt[k].add(e[k].cross(rc[k])).add(w[k].cross(w[k].cross(rc[k]))).add(Y[k].multiply(g)).multiply(m0[k]);
    k1 = k + 1; F[k] = Fk.add(Q[k1].multVec(F[k1]));
    // Вычисление по ОРФ (2) главного вектора моментов сил, приведенных к полюсу k-го тела
    Te = new SFVec3f(Tx[k].dot(e[k]), Ty[k].dot(e[k]), Tz[k].dot(e[k]));
    Tw = new SFVec3f(Tx[k].dot(w[k]), Ty[k].dot(w[k]), Tz[k].dot(w[k]));
    M[k] = rc[k].cross(Fk).add(R[k1].cross(Q[k1].multVec(F[k1]))).
    add(Te).add(w[k].cross(Tw)).add(Q[k1].multVec(M[k1])); }; }
```

2. Формализм выписывания выражений ПСФ

Для верификации формул вычисления ПСФ и тестирования JS-кодов их программной реализации нам потребуются следующие формулы. Если ТИТ(k) диагональный, т. е. $I_k^c = \text{diag}(I_{ck}^x, I_{ck}^y, I_{ck}^z)$, то формула (7.20) принимает вид

$$\dot{\bar{K}}_{ck} = \dot{K}_{ck}^x \bar{x}_k + \dot{K}_{ck}^y \bar{y}_k + \dot{K}_{ck}^z \bar{z}_k, \quad (6)$$

где

$$\dot{K}_{ck}^x = I_{ck}^x \varepsilon_k^x + I_{yk}^z \omega_k^y \omega_k^z, \quad \dot{K}_{ck}^y = I_{ck}^y \varepsilon_k^y + I_{zk}^x \omega_k^x \omega_k^z, \quad \dot{K}_{ck}^z = I_{ck}^z \varepsilon_k^z + I_{xk}^y \omega_k^x \omega_k^y \quad (7)$$

– проекции вектора $\bar{K}_{ck}$ на оси СКТ(k); $\omega_k^x, \omega_k^y, \omega_k^z$ – проекции АУС(k) на оси СКТ(k); $\varepsilon_k^x, \varepsilon_k^y, \varepsilon_k^z$ – проекции АУУ(k) на оси СКТ(k); $I_{yk}^z = I_{ck}^z - I_{ck}^y, I_{zk}^x = I_{ck}^x - I_{ck}^z, I_{xk}^y = I_{ck}^y - I_{ck}^x$.

В процессе выписывания УД будем использовать ПРФ (7.21) вычисления проекций ω_i^ξ АУС(i) на оси СКТ(i) в следующем виде:

$$\omega_i^\xi = \sum_\eta \xi_i^\eta \omega_{i-1}^\eta + q_i^\xi \dot{q}_i, \quad (8)$$

где $i = 1, 2, \dots, N, \omega_0^\eta = 0, \xi_i^\eta = \bar{\xi}_i \cdot \bar{\eta}_{i-1}$ (если $\bar{\xi}_i = \bar{\eta}_{i-1}$, то $\xi_i^\eta = 1$),

$$q_i^\xi = \begin{cases} 0, & \text{если } \bar{q}_i \in \{\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i\} \text{ и } \bar{q}_i \neq \bar{\xi}_i, \\ 1, & \text{если } \bar{q}_i = \bar{\xi}_i, \\ \bar{q}_i \cdot \bar{\xi}_i, & \text{если } \bar{q}_i \neq \bar{\xi}_i. \end{cases}$$

Здесь и далее для сокращения записей используются немые символы ξ, η, ζ , принимающие значения на множестве $\{x, y, z\}$ символов (имен, обозначений) осей СКТ. В сумме по η три слагаемых, например, $\sum_\eta A_\eta = A_x + A_y + A_z$, т. е. $\eta \in \{x, y, z\}$ [18].

В процессе выписывания ω_i^ξ по ПРФ (8) рекомендуем использовать обозначения $s_i = \sin(q_i)$, $c_i = \cos(q_i)$ и следующие таблицы обозначений направляющих косинусов осей СКТ в ВКП(i).

Таблицы направляющих косинусов осей СКТ(i) относительно СКТ(i-1)
Tables of guide cosines of the axes of the BCS(i) relative to the BCS(i-1)

$\bar{x}_i = \bar{x}_{i-1}$	$\bar{x}_i$	$\bar{y}_i$	$\bar{z}_i$
$\bar{x}_{i-1}$	1	0	0
$\bar{y}_{i-1}$	0	c_i	$-s_i$
$\bar{z}_{i-1}$	0	s_i	c_i

$\bar{y}_i = \bar{y}_{i-1}$	$\bar{x}_i$	$\bar{y}_i$	$\bar{z}_i$
$\bar{x}_{i-1}$	c_i	0	s_i
$\bar{y}_{i-1}$	0	1	0
$\bar{z}_{i-1}$	$-s_i$	0	c_i

$\bar{z}_i = \bar{z}_{i-1}$	$\bar{x}_i$	$\bar{y}_i$	$\bar{z}_i$
$\bar{x}_{i-1}$	c_i	$-s_i$	0
$\bar{y}_{i-1}$	s_i	c_i	0
$\bar{z}_{i-1}$	0	0	1

Эти таблицы используются для разложения орт осей СКТ(i) на оси СКТ(i-1). Например, если i-е тело повернуто относительно (i-1)-го тела на угол q_i вокруг оси $O_i \bar{z}_i$, то из третьей таблицы получим

$$\bar{x}_i = c_i \bar{x}_{i-1} + s_i \bar{y}_{i-1}, \quad \bar{y}_i = -s_i \bar{x}_{i-1} + c_i \bar{y}_{i-1}, \quad \bar{z}_i = \bar{z}_{i-1}, \quad x_i^z = y_i^z = 0, \quad z_i^z = 1. \quad (9)$$

В правой части ПРФ (8) в общем случае (когда все множители не равны нулю) четыре слагаемых. Для $i = 1$ $\bar{\omega}_{i-1} = \bar{\omega}_0 = 0$, т. е. $\omega_0^x = \omega_0^y = \omega_0^z = 0$ и $\omega_1^\xi = q_1^\xi \dot{q}_1$. Для МР, как правило, $q_1^x = q_1^z = 0, q_1^y = 1$, т. е. АУС(1) $\bar{\omega}_1 = (0, \dot{q}_1, 0)$. Тогда для $i = 2$ в сумме по η одно слагаемое $\xi_2^y \dot{q}_1$ и т. д.

ПРФ (7.24) вычисления проекций ξ_i^ξ АУУ(i) на оси СКТ(i) в принятых обозначениях имеет вид

$$\xi_i^\xi = \sum_\eta \left(\xi_i^\eta \varepsilon_{i-1}^\eta + q_{\eta i}^\xi \omega_{i-1}^\eta \dot{q}_i \right) + q_i^\xi \ddot{q}_i, \quad (10)$$

где $i = 1, 2, \dots, N, \varepsilon_0^\eta = 0$ и трехиндексный символ $q_{\eta i}^\xi = \bar{q}_i \times \bar{\xi}_i \cdot \bar{\eta}_{i-1}$. Если $\bar{q}_i = \bar{\xi}_i$, то $q_{\eta i}^\xi = 0$.

Рассмотрим примеры ручного выписывания формул вычисления ПСФ, которые будем использовать для тестирования разработанных JS-кодов.

Пример 1. Для маятника на рис. 1 имеем $N = 1, \bar{r}_{c1} = -b_1 \bar{y}_1, b_1 = |\overline{O_1 C_1}|, \bar{z} = \bar{z}_1, \bar{\omega}_1 = \dot{q}_1 \bar{z}_1, \bar{\varepsilon}_1 = \dot{q}_1 \bar{q}_1, \bar{r}_1 = \overline{O O_1} = 0$. Если маятник статически уравновешен, т. е. $C_1 = O_1, b_1 = 0, \bar{r}_{c1} = 0$, то по формулам (1), (2) получим $\bar{F}_1 = m_{01} g \bar{y}, \bar{M}_1 = \dot{q}_1 I_1^c \cdot \bar{z}_1 + \dot{q}_1^2 \bar{z}_1 \times I_1^c \cdot \bar{z}_1$. Используя ТИТ, в общем виде получим $I_1^c \cdot \bar{z}_1 = -J_{c1}^y \bar{x}_1 - J_{c1}^z \bar{y}_1 + I_{c1}^z \bar{z}_1, \bar{z}_1 \times I_1^c \cdot \bar{z}_1 = -J_{c1}^y y_1 + J_{c1}^z \bar{x}_1$. Следовательно,

$$\bar{M}_1 = (J_{c1}^z \dot{q}_1^2 - J_{c1}^y \dot{q}_1) \bar{x}_1 - (J_{c1}^z \dot{q}_1 + J_{c1}^y \dot{q}_1^2) \bar{y}_1 + I_{c1}^z \dot{q}_1 \bar{z}_1 = M_1^x \bar{x}_1 + M_1^y \bar{y}_1 + I_{c1}^z \dot{q}_1 \bar{z}_1.$$

В случае $b_1 > 0$ по ОРФ (1) выпишем

$$\bar{F}_1 = m_{01}[-b_1\dot{q}_1\bar{z}_1 \times \bar{y}_1 - b_1\dot{q}_1^2\bar{z}_1 \times (\bar{z}_1 \times \bar{y}_1) + g\bar{y}].$$

Учитывая, что $\bar{z}_1 \times \bar{y}_1 = -\bar{x}_1$, $\bar{z}_1 \times (\bar{z}_1 \times \bar{y}_1) = -\bar{z}_1 \times \bar{x}_1 = -\bar{y}_1$, получим

$$\bar{F}_1 = m_{01}[b_1(\ddot{q}_1\bar{x}_1 + \dot{q}_1^2\bar{y}_1) + g\bar{y}], \bar{r}_{c1} \times \bar{F}_1 = -b_1m_{01}(-b_1\dot{q}_1\bar{z}_1 - g s_1\bar{z}_1).$$

Следовательно,

$$\bar{M}_1 = M_1^x\bar{x}_1 + M_1^y\bar{y}_1 + [(I_{c1}^z + m_{01}b_1^2)\ddot{q}_1 + m_{01}gb_1\sin(q_1)]\bar{z}_1.$$

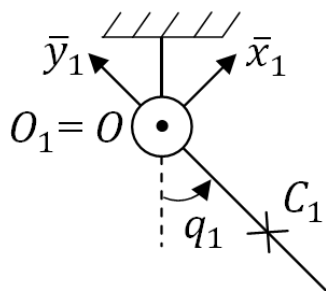


Рис. 1. Маятник
Fig. 1. The pendulum

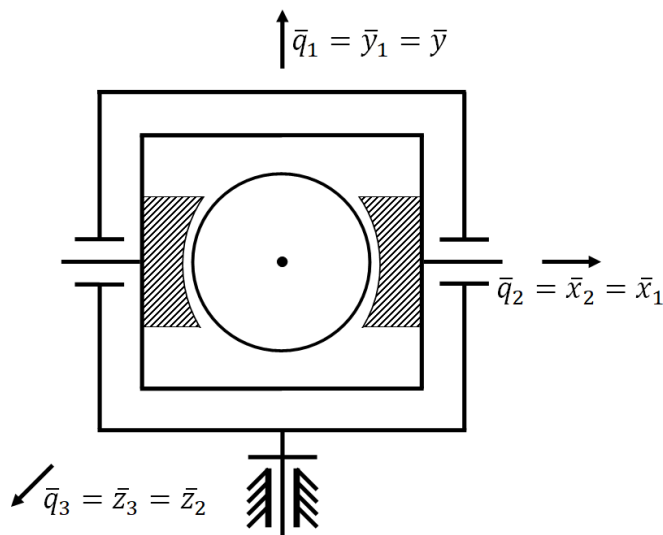


Рис. 2. Гирископ в трехосном кардановом подвесе
Fig. 2. A gyroscope in a three-axis gimbal

Пример 2. Для гироскопа в трехосном кардановом подвесе на рис. 2 имеем

$$N=3, \bar{r}_k = \bar{r}_{ck} = \bar{R}_k = 0, I_k^c = \text{diag}(I_{ck}^x, I_{ck}^y, I_{ck}^z)$$

для всех k . Следовательно, ОРФ (1), (2) принимают вид $\bar{F}_k = m_{0k}g\bar{y} + \bar{F}_{k+1}$, $\bar{M}_k = \dot{\bar{K}}_{ck} + \bar{M}_{k+1}$, где $k=2, 1$. Для $k=3$ $\bar{F}_3 = m_{03}g\bar{y}$, $\bar{M}_3 = \dot{\bar{K}}_{c3}$.

Для ротора $I_3^c = \text{diag}(I_{c3}^x, I_{c3}^y, I_{c3}^z)$, т. е. $I_{x3}^y = 0$. Следовательно, по формулам (6), (7) выпишем

$$\bar{M}_3 = \dot{\bar{K}}_{c3} = \dot{K}_{c3}^x\bar{x}_3 + \dot{K}_{c3}^y\bar{y}_3 + \dot{K}_{c3}^z\bar{z}_3, \text{ где } \dot{K}_{c3}^z = I_{c3}^z\varepsilon_3^z + I_{x3}^y\omega_3^x\omega_3^y = I_{c3}^z\varepsilon_3^z.$$

Если внешняя (наружная) рамка вращается вокруг вертикальной оси $C\bar{y}_1$, внутренняя вокруг горизонтальной оси $C\bar{x}_2$, ротор вокруг оси $C\bar{z}_3$, где C – ЦМ гироскопа, то (см. рис. 2)

$$\bar{q}_1 = \bar{y}_1 = \bar{y}, \quad \bar{q}_2 = \bar{x}_2 = \bar{x}_1, \quad \bar{q}_3 = \bar{z}_3 = \bar{z}_2.$$

Из формул (9) имеем $\bar{x}_3 = c_3\bar{x}_2 + s_3\bar{y}_2$, $\bar{y}_3 = -s_3\bar{x}_2 + c_3\bar{y}_2$, $\bar{z}_3 = \bar{z}_2$. Следовательно,

$$\begin{aligned} \bar{M}_2 &= \dot{\bar{K}}_{c2} + \dot{\bar{K}}_{c3} = \dot{K}_{c2}^x\bar{x}_2 + \dot{K}_{c2}^y\bar{y}_2 + \dot{K}_{c2}^z\bar{z}_2 + \dot{K}_{c3}^x(c_3\bar{x}_2 + s_3\bar{y}_2) + \dot{K}_{c3}^y(-s_3\bar{x}_2 + c_3\bar{y}_2) + I_{c3}^z\varepsilon_3^z\bar{z}_2 = \\ &= (\dot{K}_{c2}^x + c_3\dot{K}_{c3}^x - s_3\dot{K}_{c3}^y)\bar{x}_2 + (\dot{K}_{c2}^y + s_3\dot{K}_{c3}^x + c_3\dot{K}_{c3}^y)\bar{y}_2 + (\dot{K}_{c2}^z + I_{c3}^z\varepsilon_3^z)\bar{z}_2. \end{aligned}$$

Из второй таблицы имеем $\bar{x}_2 = \bar{x}_1$, $\bar{y}_2 = c_2\bar{y}_1 + s_2\bar{z}_1$, $\bar{z}_2 = -s_2\bar{y}_1 + c_2\bar{z}_1$. Следовательно,

$$\begin{aligned} \bar{M}_1 &= \dot{\bar{K}}_{c1} + \bar{M}_2 = \dot{K}_{c1}^x\bar{x}_1 + \dot{K}_{c1}^y\bar{y}_1 + \dot{K}_{c1}^z\bar{z}_1 + (\dot{K}_{c2}^x + c_3\dot{K}_{c3}^x - s_3\dot{K}_{c3}^y)\bar{x}_1 + \\ &+ (\dot{K}_{c2}^y + s_3\dot{K}_{c3}^x + c_3\dot{K}_{c3}^y)(c_2\bar{y}_1 + s_2\bar{z}_1) + (\dot{K}_{c2}^z + I_{c3}^z\varepsilon_3^z)(-s_2\bar{y}_1 + c_2\bar{z}_1) = \\ &= (\dot{K}_{c1}^x + \dot{K}_{c2}^x + c_3\dot{K}_{c3}^x - s_3\dot{K}_{c3}^y)\bar{x}_1 + [\dot{K}_{c1}^y + c_2(\dot{K}_{c2}^y + s_3\dot{K}_{c3}^x + c_3\dot{K}_{c3}^y) - s_2(\dot{K}_{c2}^z + I_{c3}^z\varepsilon_3^z)]\bar{y}_1 + \\ &+ [\dot{K}_{c1}^z + s_2(\dot{K}_{c2}^y + s_3\dot{K}_{c3}^x + c_3\dot{K}_{c3}^y) + c_2(\dot{K}_{c2}^z + I_{c3}^z\varepsilon_3^z)]\bar{z}_1. \end{aligned}$$

Приведем моменты сил $\bar{M}_k$ к осям вращения гироскопа и его рамок. Для ротора имеем

$$M_3 = \bar{q}_3 \cdot \bar{M}_3 = \bar{z}_3 \cdot \bar{M}_3 = I_{c3}^z\varepsilon_3^z.$$

Для внутренней рамки с учетом обозначений $I_{yk}^z = I_{ck}^z - I_{ck}^y$, $I_{zk}^x = I_{ck}^x - I_{ck}^z$, $I_{xk}^y = I_{ck}^y - I_{ck}^x$ получим

$$\begin{aligned} M_2 &= \bar{x}_2 \cdot \bar{M}_2 = \dot{K}_{c2}^x + c_3\dot{K}_{c3}^x - s_3\dot{K}_{c3}^y = I_{c2}^x\varepsilon_2^x + I_{y2}^y\omega_2^y\omega_2^z + \\ &+ c_3[I_{c3}^x\varepsilon_3^x + (I_{c3}^z - I_{c3}^y)\omega_3^y\omega_3^z] - s_3[I_{c3}^y\varepsilon_3^y + (I_{c3}^x - I_{c3}^z)I_{z3}^x\omega_3^x\omega_3^z]. \end{aligned}$$

Аналогично для внешней рамки

$$M_1 = \bar{y}_1 \cdot \bar{M}_1 = \dot{K}_{c1}^y + c_2(\dot{K}_{c2}^y + s_3 \dot{K}_{c3}^x + c_3 \dot{K}_{c3}^y) - s_2(\dot{K}_{c2}^z + I_{c3}^z \varepsilon_3^z).$$

С учетом равенств $\omega_1^x = \omega_1^z = 0$, $\varepsilon_1^y = \ddot{q}_1$, $\dot{K}_{c1}^y = I_{c1}^y \varepsilon_1^y + I_{z1}^x \omega_1^x \omega_1^z = I_{c1}^y \ddot{q}_1$ получим

$$\begin{aligned} M_1 &= I_{c1}^y \ddot{q}_1 + c_2 \dot{K}_{c2}^y - s_2 \dot{K}_{c2}^z + c_2(s_3 \dot{K}_{c3}^x + c_3 \dot{K}_{c3}^y) - I_{c3}^z s_2 \varepsilon_3^z = \\ &= I_{c1}^y \ddot{q}_1 + c_2[I_{c2}^y \varepsilon_2^y + (I_{c2}^x - I_{c2}^z) \omega_2^x \omega_2^z] - s_2[I_{c2}^z \varepsilon_2^z + (I_{c2}^y - I_{c2}^x) \omega_2^x \omega_2^y] + \\ &+ c_2\{s_3[I_{c3}^x \varepsilon_3^x + (I_{c3}^z - I_{c3}^y) \omega_3^y \omega_3^z] + c_3[I_{c3}^y \varepsilon_3^y + (I_{c3}^x - I_{c3}^z) \omega_3^x \omega_3^z]\} - I_{c3}^z s_2 \varepsilon_3^z. \end{aligned}$$

Продemonстрируем формализм выписывания по ПРФ (8), (10) проекций АУС и АУУ тел на оси СКТ.

Для $i = 1$ имеем $\bar{\omega}_1 = \dot{q}_1 \bar{y}_1$, т. е. $\omega_1^x = \omega_1^z = 0$, $\omega_1^y = \dot{q}_1$. По ПРФ (8) выпишем

$$\begin{aligned} \omega_2^x &= \sum_{\eta} x_2^{\eta} \omega_1^{\eta} + x_2^x \dot{q}_2 = x_2^y \dot{q}_1 + \dot{q}_2 = \dot{q}_2, \quad \omega_2^y = \sum_{\eta} y_2^{\eta} \omega_1^{\eta} + x_2^y \dot{q}_2 = y_2^y \dot{q}_1 = c_2 \dot{q}_1, \\ \omega_2^z &= \sum_{\eta} z_2^{\eta} \omega_1^{\eta} + x_2^z \dot{q}_2 = z_2^y \dot{q}_1 = -s_2 \dot{q}_1, \quad \omega_3^x = \sum_{\eta} x_3^{\eta} \omega_2^{\eta} + z_3^x \dot{q}_3 = c_3 \omega_2^x + s_3 \omega_2^y, \\ \omega_3^y &= \sum_{\eta} y_3^{\eta} \omega_2^{\eta} + z_3^y \dot{q}_3 = -s_3 \omega_2^x + c_3 \omega_2^y, \quad \omega_3^z = \sum_{\eta} z_3^{\eta} \omega_2^{\eta} + z_3^z \dot{q}_3 = \omega_2^z + \dot{q}_3. \end{aligned}$$

Для $i = 1$ $\bar{\varepsilon}_1 = \ddot{\omega}_1 = \ddot{q}_1 \bar{y}_1$, т. е. $\varepsilon_1^x = \varepsilon_1^z = 0$, $\varepsilon_1^y = \ddot{q}_1$. Для $i = 2$ по ПРФ (10) выпишем

$$\begin{aligned} \varepsilon_2^x &= \sum_{\eta} (x_2^{\eta} \varepsilon_1^{\eta} + x_{\eta 2}^x \omega_1^{\eta} \dot{q}_2) + x_2^x \ddot{q}_2 = x_2^y \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 = \ddot{q}_2, \\ \varepsilon_2^y &= \sum_{\eta} (y_2^{\eta} \varepsilon_1^{\eta} + x_{\eta 2}^y \omega_1^{\eta} \dot{q}_2) + x_2^y \ddot{q}_2 = y_2^y \ddot{q}_1 + \bar{z}_2 \cdot \bar{y}_1 \dot{q}_1 \dot{q}_2 = c_2 \ddot{q}_1 - s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2, \\ \varepsilon_2^z &= \sum_{\eta} (z_2^{\eta} \varepsilon_1^{\eta} + x_{\eta 2}^z \omega_1^{\eta} \dot{q}_2) + x_2^z \ddot{q}_2 = z_2^y \ddot{q}_1 - \bar{y}_2 \cdot \bar{y}_1 \dot{q}_1 \dot{q}_2 = -s_2 \ddot{q}_1 - c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2. \end{aligned}$$

Для упрощения ручного выписывания по ПРФ (8), (10) в случае $\bar{q}_i \in \{\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i\}$ рекомендуем придерживаться следующих правил. Для $i > 2$ процесс выписывания начинать с конкретизации чисел $i, i-1$ и разворачивания сумм по $\eta \in \{x, y, z\}$, где символ q в обозначениях $q_{\eta i}^{\xi}$ и q_i^{ξ} заменять на соответствующий символ из множества $\{x, y, z\}$. Например, для $i = 3$ и (в нашем случае) $\bar{q}_3 = \bar{z}_3$ ПРФ (10) принимает вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_3^{\xi} &= \sum_{\eta} (\xi_{\eta 3}^{\eta} \varepsilon_2^{\eta} + z_{\eta 3}^{\xi} \omega_2^{\eta} \dot{q}_3) + z_3^{\xi} \ddot{q}_3 = \\ &= \xi_3^x \varepsilon_2^x + z_{x3}^x \omega_2^x \dot{q}_3 + \xi_3^y \varepsilon_2^y + z_{y3}^y \omega_2^y \dot{q}_3 + \xi_3^z \varepsilon_2^z + z_{z3}^z \omega_2^z \dot{q}_3 + z_3^{\xi} \ddot{q}_3. \end{aligned}$$

Теперь можно конкретизировать символ $\xi \in \{x, y, z\}$, где в трехсимвольных обозначениях типа z_{x3}^{ξ} , z_{y3}^{ξ} , z_{z3}^{ξ} вектор $\bar{q}_i \times \bar{\xi}_i$ заменить на соответствующий орт из множества $\{\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i\}$. В рассматриваемом примере из общего по ξ выражения ε_3^{ξ} последовательно для $\xi = x$, $\xi = y$, $\xi = z$ выпишем

$$\begin{aligned} \varepsilon_3^x &= x_3^x \varepsilon_2^x + \bar{y}_3 \cdot \bar{x}_2 \omega_2^x \dot{q}_3 + x_3^y \varepsilon_2^y + \bar{y}_3 \cdot \bar{y}_2 \omega_2^y \dot{q}_3 + x_3^z \varepsilon_2^z + \bar{y}_3 \cdot \bar{z}_2 \omega_2^z \dot{q}_3 + z_3^x \ddot{q}_3, \\ \varepsilon_3^y &= y_3^x \varepsilon_2^x - \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_2 \omega_2^x \dot{q}_3 + y_3^y \varepsilon_2^y - \bar{x}_3 \cdot \bar{y}_2 \omega_2^y \dot{q}_3 + y_3^z \varepsilon_2^z - \bar{y}_3 \cdot \bar{z}_2 \omega_2^z \dot{q}_3 + z_3^y \ddot{q}_3, \\ \varepsilon_3^z &= z_3^x \varepsilon_2^x + z_3^y \varepsilon_2^y + z_3^z \varepsilon_2^z + z_3^z \ddot{q}_3. \end{aligned}$$

В заключение при помощи одной из таблиц нужно осуществить конкретизацию символов типа ξ_i^{η} и скалярных произведений орт СКТ. Номер таблицы определяется по орту $\bar{q}_i$. Если $\bar{q}_i = \bar{x}_i$, то используется первая таблица. Если $\bar{q}_i = \bar{y}_i$, то вторая. Иначе – третья. В нашем случае $\bar{q}_3 = \bar{z}_3$ и, следовательно, окончательно получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_3^x &= c_3 \varepsilon_2^x - s_3 \omega_2^x \dot{q}_3 + s_3 \varepsilon_2^y + c_3 \omega_2^y \dot{q}_3 = c_3(\varepsilon_2^x + \omega_2^y \dot{q}_3) + s_3(\varepsilon_2^y - \omega_2^x \dot{q}_3), \\ \varepsilon_3^y &= -s_3 \varepsilon_2^x - c_3 \omega_2^x \dot{q}_3 + c_3 \varepsilon_2^y - s_3 \omega_2^y \dot{q}_3 = c_3(\varepsilon_2^y - \omega_2^x \dot{q}_3) - s_3(\varepsilon_2^x + \omega_2^y \dot{q}_3), \\ \varepsilon_3^z &= \varepsilon_2^z + \ddot{q}_3. \end{aligned}$$

Таким образом, все формулы для вычисления ПСФ гироскопа выписаны. После их подстановки в формулы вычисления M_1, M_2, M_3 и элементарных упрощений получим следующую систему УД гироскопа:

$$\begin{cases} [I_{c1}^y + I_{c2}^z + I_{c3}^z + (I_{z3}^y + I_{z3}^x) c_2^2] \ddot{q}_1 - I_{c3}^z s_2 \ddot{q}_3 + 2(I_{x3}^z + I_{y2}^z) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - I_{c3}^z c_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3 = M_1, \\ (I_{c2}^x + I_{c3}^x) \ddot{q}_2 - (I_{x3}^z + I_{y2}^z) s_2 c_2 \dot{q}_1^2 + I_{c3}^z c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_3 = M_2, \\ I_{c3}^z (\ddot{q}_3 - s_2 \ddot{q}_1 - c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2) = M_3. \end{cases} \quad (11)$$

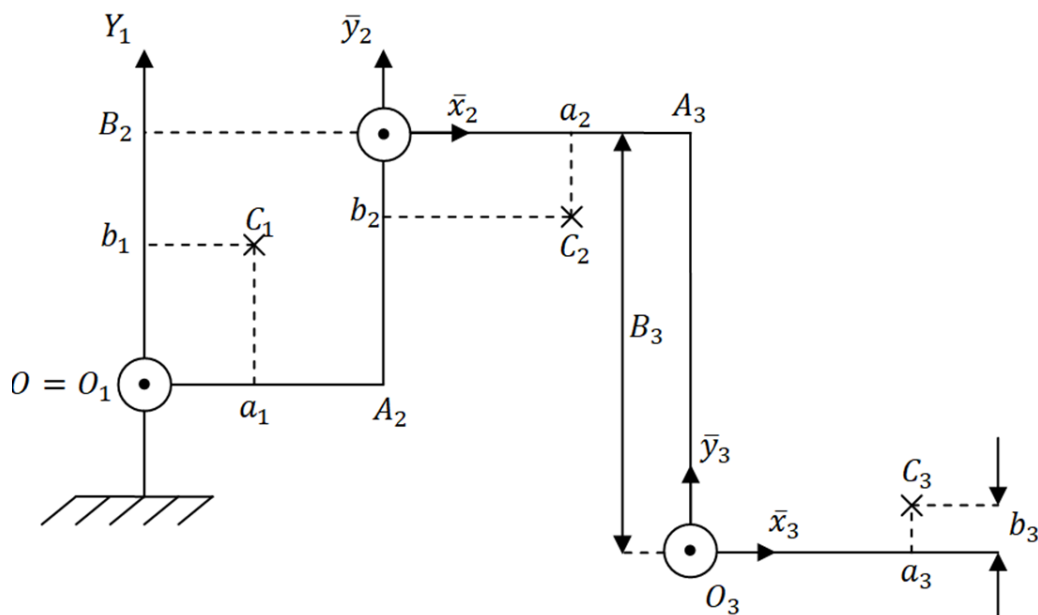


Рис. 3. Система трех тел в вертикальной плоскости
Fig. 3. A system of three bodies in a vertical plane

Пример 3. Для СТ в вертикальной плоскости на рис. 3 имеем $N = 3$ и ОРФ вычисления движущих моментов сил $M_i = \bar{z} \cdot \bar{M}_i$ имеют вид [13]

$$\begin{cases} M_3 = a_{23}(c_{23}\ddot{q}_1 + s_{23}\dot{q}_1^2) + b_{23}(s_{23}\ddot{q}_1 - c_{23}\dot{q}_1^2) + \\ + a_{33}(c_3\ddot{q}_{12} + s_3\dot{q}_{12}^2) + b_{33}(s_3\ddot{q}_{12} - c_3\dot{q}_{12}^2) + I_{d3}^z\ddot{q}_{13} + g(m_3^x c_{13} - m_3^y s_{13}), \\ M_2 = a_{22}(c_2\ddot{q}_1 + s_2\dot{q}_1^2) + b_{22}(s_2\ddot{q}_1 - c_2\dot{q}_1^2) + \\ + a_{33}(c_3\ddot{q}_{13} - s_3\dot{q}_{13}^2) + b_{33}(s_3\ddot{q}_{13} + c_3\dot{q}_{13}^2) + I_{d2}^z\ddot{q}_{12} + g(m_2^x c_{12} - m_2^y s_{12}) + M_3, \\ M_1 = a_{22}(c_2\ddot{q}_{12} - s_2\dot{q}_{12}^2) + b_{22}(s_2\ddot{q}_{12} + c_2\dot{q}_{12}^2) + \\ + a_{23}(c_{23}\ddot{q}_{13} - s_{23}\dot{q}_{13}^2) + b_{23}(s_{23}\ddot{q}_{13} + c_{23}\dot{q}_{13}^2) + I_{d1}^z\ddot{q}_1 + g(m_1^x c_1 - m_1^y s_1) + M_2, \end{cases}$$

где использованы три множества постоянных параметров, выраженных через ППТ. Во-первых, m_i^x, m_i^y – проекции статического момента i -го Дополненного Тела (ДТ(i)) на оси $O_i\bar{x}_i, O_i\bar{y}_i$ СКТ(i), в частности,

$$m_3^x = m_{03}a_3, m_3^y = m_{03}b_3, m_2^x = m_{02}a_2 + m_3A_3, m_2^y = m_{02}b_2 + m_3B_3, \\ m_1^x = m_{01}a_1 + m_2A_2, m_1^y = m_{01}b_1 + m_2B_2,$$

где m_3 – масса ДТ(i), вычисляемая по ОРФ $m_i = m_{0i} + m_{i+1}$ [18]. Во-вторых, моменты инерции ДТ(i) относительно оси $O_i\bar{z}$ ($\bar{z}$ – нормаль к плоскости движения), в частности, [18]

$$I_{d3}^z = I_{c3}^z + m_{03}(a_3^2 + b_3^2), I_{d2}^z = I_{c2}^z + m_{02}(a_2^2 + b_2^2) + m_3(A_3^2 + B_3^2), \\ I_{d1}^z = I_{c1}^z + m_{01}(a_1^2 + b_1^2) + m_2(A_2^2 + B_2^2).$$

В-третьих,

$$a_{22} = A_2m_2^x + B_2m_2^y, b_{22} = B_2m_2^x - A_2m_2^y, a_{23} = A_2m_3^x + B_2m_3^y, b_{23} = B_2m_3^x - A_2m_3^y, \\ a_{33} = A_3m_3^x + B_3m_3^y, b_{33} = B_3m_3^x - A_3m_3^y.$$

Остальные обозначения являются следующими функциями углов поворота:

$$q_{12} = q_1 + q_2, q_{13} = q_1 + q_2 + q_3, q_{23} = q_2 + q_3, \\ s_i = \sin(q_i), c_i = \cos(q_i), s_{ij} = \sin(q_{ij}), c_{ij} = \cos(q_{ij}).$$

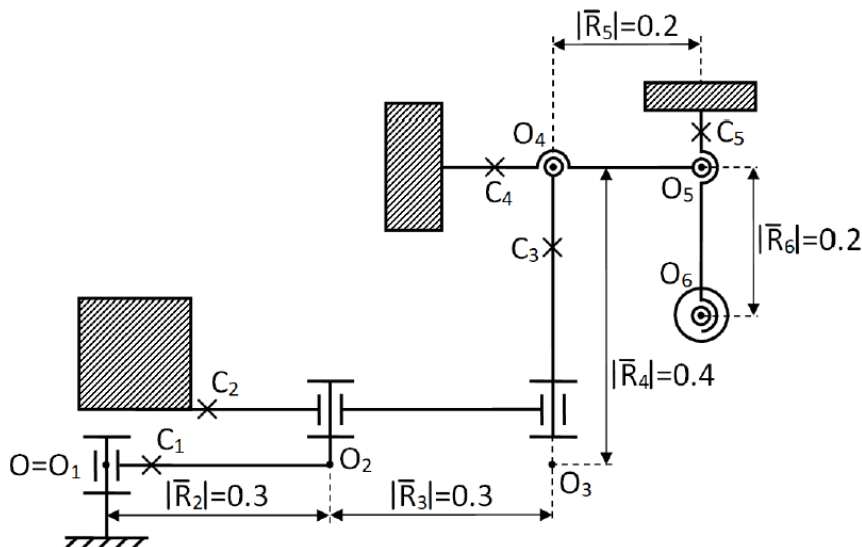


Рис. 4. Динамически уравновешенная система шести тел
Fig. 4. Dynamically balanced system of six bodies

Пример 4. На рис. 4 изображена динамически уравновешенная система шести тел, ППТ которой представлены в следующей таблице.

Таблица ППТ СТ на рис. 4
The table of CBP BS in Fig. 4

i	$\bar{R}_i$	m_{oi}	$\bar{r}_{ci}$	I_{ci}	J_{ci}
1	0 0 0	4	0.1 0 0	0.2 0.15 0.2	0.0 0.0 0.0
2	0.3 0 0	2	-0.3 0.1 0	0.875 0.2 0.12	0.0 0.0 0.0
3	0.3 0 0	0.2	0 0.3 0	0.3 0.26 0.13	0.0 0.0 0.0
4	0 0.4 0	1.2	-0.1 0 0	0.076 0.04 0.04	0.0 0.0 0.0
5	0.2 0 0	0.4	0 0.1 0	0.02 0.032 0.02	0.0 0.0 0.0
6	0 -0.2 0	0.2	0 0 0	0.002 0.002 0.001	0.0 0.0 0.0

УД этой СТ имеют вид

$$\begin{cases} (I_{a1}^y + I_{a2}^y + I)\ddot{q}_1 + (I_{a2}^y + I)\ddot{q}_2 + I\ddot{q}_3 = M_1^y, \\ (I_{a2}^y + I)(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + I\ddot{q}_3 = M_2^y, \\ I(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) = M_3^y, \\ (I_{c4}^x + I_{c5}^y + I_{c6}^z)\ddot{q}_4 + (I_{c5}^y + I_{c6}^z)\ddot{q}_5 + I_{c6}^z\ddot{q}_6 = M_4^z, \\ (I_{c5}^y + I_{c6}^z)(\ddot{q}_4 + \ddot{q}_5) + I_{c6}^z\ddot{q}_6 = M_5^z, \\ I_{c6}^z(\ddot{q}_4 + \ddot{q}_5 + \ddot{q}_6) = M_6^z, \end{cases}$$

где $I = I_{c3}^y + I_{c4}^y + I_{c5}^y + 0.038$, $I_{a1}^y = I_{c1}^y + m_{01}a_1^2 + m_2A_2^2$, $I_{a2}^y = I_{c2}^y + m_{02}a_2^2 + m_3A_3^2$, т. е. не зависят от состояния тел (от углов поворота и угловых скоростей тел) и множители при ускорениях постоянны. Поэтому для любых значений q_i , $\dot{q}_i$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) значения ПСФ M_1^y , M_2^y , M_3^y , M_4^z , M_5^z , M_6^z остаются неизменными, что подтверждено в процессе тестирования.

Процесс тестирования разработанных JS-кодов осуществляется путем сравнения результатов решения ПЗД при помощи этих кодов и при помощи формул вычисления ПСФ или движущих моментов сил, полученных (выведенных) другими исследователями, и/или другими методами. Здесь для тестирования ПО использованы УД, представленные в примерах 1–4.

Формулы примера 1 известны из учебников по теоретической механике.

УД гироскопа, выписанные в примере 2, совпадают с УД, выведенными по формализму Лагранжа в монографии [17, с. 130]. Последние два УД (11) совпадают с УД гироскопа, выведенными в учебном пособии [19, с. 104–107]. В первом уравнении книги [19] отсутствует слагаемое $I_{c3}^z s_2 \ddot{q}_3$. Однако ротор гироскопа для внешней рамки является несомым телом, поэтому для

$q_2 \neq 0$ он влияет на динамику этой рамки. Например, в случае $q_2 = \pi/2$ ось вращения внешней рамки и ротора совпадают, т. е. кинетическая энергия гироскопа должна содержать слагаемое $I_{c3}^z(\dot{q}_1 + \dot{q}_3)^2$. Следовательно, согласно формализму Лагранжа первое уравнение системы (11) должно содержать ускорение $\ddot{q}_3$.

Числовые значения моментов сил M_i , вычисленные по формулам (12) для ЗДТ, совпадают с решением ПЗД СТ на рис. 3 с использованием тестируемых JS-кодов в листингах 1, 2. Формулы (12) являются частным случаем УД СТ в вертикальной плоскости, выведенные по формализму Аппеля, т. е. никак не связаны с формулами (1)–(5) [13]. В формулах вычисления движущих моментов сил, выписанных в примере 3, использованы ПРФ (8) и (10), не входящие в алгоритмическое обеспечение тестируемых кодов.

Для тестирования ПО мы использовали также целый класс тестов, основанных на УД статически и динамически уравновешенных СТ [13].

3. Прототипирование данных для численного решения ПЗД МР

В качестве примера, демонстрирующего предлагаемый способ создания данных, рассмотрим Шаровой Маятник (ШМ) по следующим причинам. Во-первых, для ШМ $N = 1$ (тривиальный случай СТ). Во-вторых, для ШМ все JS-коды – самые короткие. В-третьих, ПЗД для ШМ решается элементарно. Поэтому на примере ШМ в первую очередь осуществляется верификация формул и тестирование JS-кодов их цифровой реализации. X3D-разметка ШМ на рис. 1 приведена в листинге 3. Здесь используется первый способ создания и хранения данных. Поэтому после первых трех типовых строк кода декларируются четыре подключения внешних прототипов, за которыми следуют вложенные друг в друга Узлы Трансформации (УТ), размечающие структуру моделируемой СТ. В рассматриваемом примере – это ШМ, состоящий из двух тел (основания и тела с закрепленной точкой). В УТ каждого тела вложены экземпляры прототипов, в которых формируются данные.

Узлы <KeySensor>, <Script> и <ROUTE> декларируют управление задачами нажатием клавиш. Простейший JS-код управления запуском решения ПЗД МР представлен в листинге 4. Последние пять скриптов загружаются к исполнению соответствующих JS-кодов.

Листинг 3. X3D-разметка ШМ (ШМ.x3d – запускаемый файл)

```
<?xml version = "1.0" encoding = "UTF-8"?>
<X3D version = '3.2'> <WorldInfo title = "ШМ.x3d"/>
<Scene><Background skyColor = "1 1 1"/><Viewpoint position = "0 0 2"/>
<ExternProtoDeclare name = "прототипТела" url = "данныеМР/ПО/прототипТела.x3d"/>
<ExternProtoDeclare name = "прототипППТ" url = "данныеМР/ПО/проППТ.x3d"/>
<ExternProtoDeclare name = "прототипЗДТ" url = "данныеМР/ПО/проЗДТ.x3d"/>
<ExternProtoDeclare name = "прототипПСФ" url = "данныеМР/ПО/проПСФ.x3d"/>
<Transform DEF = "Тело_0"><ProtoInstance DEF = "тело_0" name = "прототипТела"/>
<ProtoInstance DEF = "ППТ_0" name = "прототипППТ"/>
<ProtoInstance DEF = "ЗДТ_0" name = "прототипЗДТ"/>
<ProtoInstance DEF = "ПСФ_0" name = "прототипПСФ"/>
<Transform DEF = "Тело_1"><ProtoInstance DEF = "тело_1" name = "прототипТела"/>
<ProtoInstance DEF = "ППТ_1" name = "прототипППТ"/>
<ProtoInstance DEF = "ЗДТ_1" name = "прототипЗДТ"/>
<ProtoInstance DEF = "ПСФ_1" name = "прототипПСФ"/>
</Transform></Transform>
<KeySensor DEF = "клавиша"/>
<Script DEF = "управление" directOutput = "TRUE" url = "данныеМР/ПО/задачи.js">
<field name = "символ" type = "SFString" accessType = "inputOnly"/>
</Script>
<ROUTE fromField = "keyPress" fromNode = "клавиша"
toField = "символ" toNode = "управление"/>
<Script url = "данныеМР/ШМ/ППТ.js"/><Script url = "данныеМР/ШМ/ППТ.js"/>
<Script url = "данныеМР/ШМ/ЗДТ.js"/><Script url = "данныеМР/ШМ/ПСФ.js"/>
<Script url = "данныеМР/ШМ/test.js"/>
</Scene> </X3D>
```

К входным относятся Геометрические Параметры Тел (ГПТ), подробно описанные в статье [1], где изложены три способа (простейший, простой и типовой) описания геометрии тел в ХЗД-моделях МР. Здесь мы используем цифровые коды типовых моделей тел, которые записываются в файл ГПТ.js. ГПТ формируются и хранятся в экземплярах внешнего ХЗД-прототипа с именем "прототипТела", разметка которого представлена в статье [1].

Листинг 4. JS-код управления задачами нажатием клавиш

```
function символ(код) {  
  switch(код) { case "с": ППТ_МР(); break;  
    case "s": ЗДТ_МР(); КФТ_МР(); ПСФ_МР(); выводПСФ(); break; }; };
```

ППТ формируются и хранятся в экземплярах внешнего ХЗД-прототипа "проППТ", разметка которого повторяет листинг 10 статьи [1] за исключением значения поля url, содержащего адрес JS-кода генератора ППТ. В листинге 5 приведен JS-код записи ППТ в экземпляры прототипа "проППТ".

Листинг 5. JS-код генератора тринадцати цифровых кодов ППТ

```
//  $R_k^x, R_k^y, R_k^z$  (R), m0,  $c_k^x, c_k^y, c_k^z$  (rc),  $I_{ck}^x, I_{ck}^y, I_{ck}^z$  (Ic),  $J_{ck}^x, J_{ck}^y, J_{ck}^z$  (Jc)  
function Параметры(пар) { value = new MFFloat(пар[0], пар[1], пар[2], пар[3],  
  пар[4], пар[5], пар[6], пар[7], пар[8], пар[9], пар[10], пар[11], пар[12]);  
  Browser.currentScene.getNamedNode('ППТ').addChild(value);}
```

В листинге 6 приведены ППТ ШМ массой 2 [кг], ЦМ которого расположен ниже точки подвеса на расстоянии 0.3 [м] и ТИТ(1) = diag(0.1, 0.01, 0.1) [кг·м²]. Оператор сцена.getNamedNode('ППТ_0').код = new MFFloat(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) используется для задания количества подвижных тел N (первое число в списке кодов), и остальные числа используются для кодирования различных способов описания постоянных параметров привода, постоянных параметров шарнирных узлов и других постоянных параметров МР, рассмотрение которых выходит за пределы заявленной темы статьи.

Листинг 6. JS-код инициализации ППТ ШМ

```
var сцена = Browser.currentScene;  
function initialize() {  
  сцена.getNamedNode('ППТ_0').код = new MFFloat(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 );  
  сцена.getNamedNode('ППТ_1').код = new MFFloat(  
    // R, m0 rc Ic Jc  
    0, 0, 0, 2, 0, -0.3, 0, 0.1, 0.01, 0.1, 0, 0, 0 );  
};
```

Для записи геометрических ППТ R_k^x, R_k^y, R_k^z в поле translation УТ(k), а также записи МИП в глобальные списки, используется js-функция ППТ_МР(), код которой представлен в листинге 7.

Листинг 7. JS-код записи ППТ в глобальные списки R = [], m0 = [], rc = [], Ic = [], Jc = []

```
function ППТ_МР() { П = сцена.getNamedNode('ППТ_0').код;  
  N = П[0]; // N – количество подвижных тел  
  for ( var k = 1; k <= N; k++) {  
    Тело[k] = сцена.getNamedNode('Тело_' + parseFloat(k)); // взять УТ(k)  
    П = сцена.getNamedNode('ППТ_' + parseFloat(k)).код; // взять ППТ(k)  
    Тело[k].translation = new SFVec3f(П[0], П[1], П[2]);  
    R[k] = Тело[k].translation; // межполюсный вектор k-го тела  
    m0[k] = П[3]; rc[k] = new SFVec3f(П[4], П[5], П[6]); // масса и вектор ЦМ k-го тел  
    Ic[k] = new SFVec3f(П[7], П[8], П[9]); // ОМИ(k) в ЦСК(k)  
    Jc[k] = new SFVec3f(П[10], П[11], П[12]); // ЦМИ(k) в ЦСК(k)  
    // формирование Тензора Инерции k-го тела (ТИТ)  
    Tx[k] = new SFVec3f( Ic[k].x, -Jc[k].x, -Jc[k].y);  
    Ty[k] = new SFVec3f(-Jc[k].x, Ic[k].y, -Jc[k].z);  
    Tz[k] = new SFVec3f(-Jc[k].y, -Jc[k].z, Ic[k].z);  
  }; };
```

Аналогично реализованы X3D-прототипы "проЗДТ" и "проПСФ".

Код js-функции, формирующий (создающий), обрабатывающий и представляющий ЗДТ, разрабатывается пользователем. Способы задания (описания) ЗДТ закодированы числами 0, 1, 2, 3, ..., где 0 – код табличного описания, 1 – код графического описания, 2 – код аналитического описания, 3 – код словесного описания. Перечисленные способы описания ЗДТ преобразуются в таблицу, где между соседними (по времени) значениями ЗДТ осуществляется линейная интерполяция. Здесь нам потребуется простейшее описание заданных значений НКОП(k) $\bar{q}_k$, угла поворота q_k , угловой скорости $\dot{q}_k$ и ускорения $\ddot{q}_k$ k -го тела МР в текущий момент времени, т. е. для тестирования разработанных JS-кодов решения ПЗК будем использовать КПТ(k).

В СКТ(k)

$$\bar{q}_k = q_k^x \bar{x}_k + q_k^y \bar{y}_k + q_k^z \bar{z}_k$$

– орт оси $O_k \bar{q}_k$ поворота k -го тела относительно $(k-1)$ -го тела, где q_k^x, q_k^y, q_k^z – НКОП(k) $O_k \bar{q}_k$ в СКТ(k). Для хранения перечисленных параметров используется X3D-прототип "проЗДТ". JS-коды его генератора параметров и их инициализации аналогичны листингам 5 и 6. Разница только в количестве параметров. Экземпляр X3D-прототипа "проЗДТ" для k -го тела содержит семь цифр – t (текущее время), q_k^x, q_k^y, q_k^z (НКОП(k) в момент времени t), $q_k, \dot{q}_k, \ddot{q}_k$ (угол поворота, его скорость и ускорение в момент времени t). В листинге 8 приведено ЗДТ ШМ в момент времени $t = 0$. Оператор

сцена.getNamedNode('ЗДТ_0').код = new MFFloat(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)

используется для кодирования различных способов описания ЗДТ МР. Если первое число равно нулю, то ориентация тел задается относительными ПЭ и JS-код их вычисления через другие параметры ориентации тел МР не используется. Если второе число равно нулю, то задаются движения тел только в один (начальный, текущий) момент времени. Остальные числа управляют величиной шага по времени (постоянный или меняющийся по определенному алгоритму), значением НКОП (для ВКП он постоянный, для шаровых с пальцем или шаровых кинематических пар – он переменный) и т. д.

Из листинга 8 видно, что ШМ в момент времени $t = 0$ повернут вокруг оси $O_1 \bar{z}_1$ ($q_x = 0, q_y = 0, q_z = 1$) на угол $q_1 = 0,5$ радиан, имеет угловую скорость $\dot{q}_1 = 1/\text{с}$ и ускорение $\ddot{q}_1 = 2/\text{с}^2$.

Листинг 8. JS-код инициализации ЗДТ ШМ

```
var сцена = Browser.currentScene;
function initialize() {
сцена.getNamedNode('ЗДТ_0').код = new MFFloat( 0,0, 0, 0,0, 0, 0 );
сцена.getNamedNode('ЗДТ_1').код = new MFFloat(
// t, qx, qy, qz, q, qt, qtt
0, 0, 0, 1, 0.5, 1, 2 );
};
```

По списку орт $\bar{q}_k$ и диапазонам изменения относительных углов поворота тел определяется коэффициент сервиса МР [7]. В листинге 9 приведен JS-код, который после загрузки МР в X3D-сцену автоматически записывает параметры q_k^x, q_k^y, q_k^z в поле rotation УТ(k) и формирует глобальные переменные.

Листинг 9. JS-код записи ЗДТ в глобальные переменные Q = [], q = [], qt = [], qtt = []

```
function ЗДТ_МР() { for ( var k = 1; k <= N; k++) {
П = сцена.getNamedNode('ЗДТ_' + parseFloat(k)).код; // взять код ЗДТ(k)
q[k] = П[4]; qt[k] = П[5]; qtt[k] = П[6]; Тело[k].rotation = new SFRotation(П[1], П[2], П[3], q[k]);
Q[k] = Тело[k].rotation; // Параметр Эйлера k-го тела
}; };
```

ПСФ, вычисленные в процессе решения ПЗД, записываются и хранятся (до востребования) в экземплярах X3D-прототипа "проПСФ". Экземпляр прототипа "проПСФ" для k -го тела содержит семь цифр – t (текущее время), F_k^x, F_k^y, F_k^z (проекции силы на оси СКТ в момент времени t),

M_k^x, M_k^y, M_k^z (проекции момента силы на оси СКТ в момент времени t). По аналогии с листингом 8 оператор

сцена.getNamedNode('ПСФ_0').код = new MFFloat(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)

используется для кодирования различных вариантов сохранения ПСФ МР (0 – в виде таблиц, 1 – в виде графиков, 2 – выборочно, например, сохранять только экстремальные значения ПСФ и т. д.).

Числовые значения ППТ, КПТ и ЗДТ автоматически переносятся из html- или Exel-таблиц в соответствующие цифровые коды листингов 6, 8, т. е. пользователю не обязательно знать, как реализован описанный способ формирования и хранения входных данных ПЗД МР.

Основное достоинство предложенного способа прототипирования данных состоит в его гибкости, обеспеченной описанием данных через Цифровые Коды (ЦК), введенные в статье [1] для описания геометрии тел и использованные в статье [2] для прототипирования схвата. Важно отметить, что часть ЦК задает пользователь для управления вариантами трактовки данных, описывающих параметры МР [1, 2]. Все ЦК имеют один тип (MFFloat), и режим доступа к ним декларируется в теле соответствующего прототипа [1] (см. листинги 4, 10).

4. Формирование данных в узле <Script> для численного решения ПЗД МР

ППТ, ЗДТ, ПСФ и другие параметры тел и МР в целом можно формировать и хранить в интерфейсной части узла <Script>, которая полностью совпадает с интерфейсной частью X3D-прототипа. По сути узел <Script> – это экземпляр внешнего X3D-прототипа, разработанного авторами языка X3D [20]. В статье [2] приведен интерфейс двухпальцевого схвата и подробно описаны типы X3D-данных и режимы доступа к ним (см. листинг 5 и с. 55). Здесь в листинге 10 приведен пример описания данных (для СТ на рис. 3) в интерфейсной части узла <Script>.

Листинг 10. X3D-разметка структуры и данных (ППТ, ЗДТ, ПСФ) СТ на рис. 3

```
<?xml version = "1.0" encoding = "UTF-8"?>
<X3D version = '3.2'>
<Scene><Background skyColor = "1 1 1"/><Viewpoint position = "0 0 5"/>
<Transform DEF = "Тело_0"><Inline DEF = "тело_0" url = "данныеМР/ПМП3/тело_0.x3d"/>
<Transform DEF = "Тело_1"><Inline DEF = "тело_1" url = "данныеМР/ПМП3/тело_1.x3d"/>
<Transform DEF = "Тело_2"><Inline DEF = "тело_2" url = "данныеМР/ПМП3/тело_2.x3d"/>
<Transform DEF = "Тело_3"><Inline DEF = "тело_3" url = "данныеМР/ПМП3/тело_3.x3d"/>
</Transform></Transform></Transform></Transform>
<Script url = "данныеМР/ПМП3/ПМП3.js">
<field accessType = "initializeOnly" name = "R" type = "MFVec3f"
value = "0 0 0, 0 0 0, 0.5 0.5 0, 0.5 -0.8 0"/>
<field accessType = "initializeOnly" name = "m0" type = "MFFloat" value = "0, 3, 2, 1"/>
<field accessType = "initializeOnly" name = "rc" type = "MFVec3f"
value = "0 0 0, 0.2 0.3 0, 0.4 -0.1 0, 0.4 0.1 0"/>
<field accessType = "initializeOnly" name = "Ic" type = "MFVec3f"
value = "0 0 0, 0.02 0.1 0.1, 0.01 0.01 0.01, 0.0015 0.01 0.01"/>
<field accessType = "initializeOnly" name = "Jc" type = "MFVec3f"
value = "0 0 0, 0 0 0, 0 0 0, 0 0 0"/>
<field accessType = "inputOutput" name = "Q" type = "MFRotation"
value = "0 0 1 0, 0 0 1 1, 0 0 1 1, 0 0 1 1"/>
<field accessType = "inputOutput" name = "q" type = "MFFloat" value = "0 1.1 1.2 1.3"/>
<field accessType = "inputOutput" name = "qt" type = "MFFloat" value = "0 2.1 2.2 2.3"/>
<field accessType = "inputOutput" name = "qqt" type = "MFFloat" value = "0 3.1 3.2 3.3"/>
<field accessType = "outputOnly" name = "F" type = "MFVec3f"/>
<field accessType = "outputOnly" name = "M" type = "MFVec3f"/>
</Script> </Scene> </X3D>
```

В листинге 11 на примере моделирования основания СТ на рис. 3 представлены JS-коды цифровых моделей тел МР. В листинге 12 использован простейший способ создания ЦК модели основания [1]. Модели остальных тел описываются аналогично. В листинге 13 представлен JS-код формирования глобальных списков данных и обращения к JS-функциям решения ПЗД МР.

Листинг 11. X3D-разметка стойки СТ на рис. 3

```
<?xml version = "1.0" encoding = "UTF-8"?> <X3D version = '3.2'>
<Scene> <Background skyColor = "1 1 1"/> <Viewpoint position = "0 0 3"/>
<ExternProtoDeclare name = "прототипТела" url = "данныеМР/ПМР3/прототипТела.x3d"/>
<ProtoInstance DEF = "тело_0" name = "прототипТела"/>
<Script url = "данныеМР/ПМР3/ГПТ_0.js"/>
</Scene></X3D>
```

Листинг 12. JS-код цифрового кодирования основания СТ на рис. 3

```
//данныеМР/ПМР3/ГПТ_0.js
var сцена = Browser.currentScene;
function initialize() { сцена.getNamedNode('тело_0').код = new MFFloat(
0, 0.2, 0.02, 0.02, 0, -0.1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0,
0, 0.02, 0.1, 0.02, 0, -0.05, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0);
};
```

Изложенные здесь способы описания данных можно комбинировать. Варианты эффективных комбинаций определяются целями цифрового моделирования МР, РТК, ГПС и задачами, решаемыми для достижения этих целей. Здесь мы рассмотрели решение ПЗД, т. е. самой простой, но очень важной задачи. Для решения ПЗД достаточно использовать любой из двух способов формирования, хранения и использования данных.

Листинг 13. JS-код формирования глобальных списков и решения ПЗД

```
// Перечень глобальных величин
var Тело = [], Tx = [], Ty = [], Tz = [], Y = [], e = [], w = [], rtt = [],
сцена = Browser.currentScene;
function initialize() { for ( var k = 0; k <= N; k++)
{ Тело[k] = сцена.getNamedNode('Тело_' + parseFloat(k));
Тело[k].translation = R[k]; Тело[k].rotation = Q[k];
// формирование Тензора Инерции k-го тела (ТИТ)
Tx[k] = new SFVec3f( Ic[k].x, -Jc[k].x, -Jc[k].y);
Ty[k] = new SFVec3f(-Jc[k].x, Ic[k].y, -Jc[k].z);
Tz[k] = new SFVec3f(-Jc[k].y, -Jc[k].z, Ic[k].z);
}; КФТ_МР(); ПСФ_МР(); };
```

В конце статьи [1] мы указали, что для моделирования тел МР не обязательно использовать предложенные три способа (простейший, простой и типовой), т. е. пользователи предлагаемой теории могут создавать файлы "тело_i.x3d" путем X3D-программирования. Такая возможность сохраняется, так как в декларации (Inline-подключения модели стойки)

```
<Inline DEF = "тело_0" url = "данныеМР/ПМР3/тело_0.x3d"/>
файл "тело_0.x3d" может содержать X3D-разметку стойки СТ на рис. 3.
```

5. О расширении, дополнении и распределении параметров МР

Для вычисления МИП тела, моделируемого простейшими Графическими Объектами (ГО), т. е. боксами, цилиндрами, конусами и шарами, достаточно Цифровой Код (ЦК) каждого ГО, содержащего 14 чисел [1], расширить величиной плотности (ρ) равномерного распределения массы ГО и десятью новыми числами, описывающими МИП ГО. Тогда ЦК цифровой модели тела будет содержать строки следующих 25 чисел:

$k, x, y, z, X, Y, Z, c_x, c_y, c_z, q, R, G, B, \rho, m, x_c, y_c, z_c, i_x, i_y, i_z, j_x, j_y, j_z$,
где k – код ГО (0 – бокс, 1 – цилиндр, 2 – конус, 3 – шар); x, y, z – размеры ГО вдоль осей СКТ; X, Y, Z – декартовы координаты геометрического центра ГО в СКТ; c_x, c_y, c_z, q – ПЭ поворота ГО относительно СКТ; R, G, B – код цвета ГО; ρ – плотность распределения массы ГО; m – масса ГО; x_c, y_c, z_c – координаты ЦМ ГО в СКТ; i_x, i_y, i_z – ОМИ ГО в СКТ; j_x, j_y, j_z – ЦМИ ГО в СКТ.

Количество таких строк равно числу ГО в модели тела. Если $\rho = 0$, то МИП ГО не вычисляются. В этом случае исследователь должен ввести числовые значения МИП в ППТ или перенести их из конструкторской документации в таблицы входных ППТ МР (при наличии такой документации). Еще один способ определения МИП тел связан с решением задачи идентификации параметров тел МР.

ГПТ дополняются, например, для учета деталей приводов, расположенных на теле. Отметим, что на i -м теле могут располагаться детали и передаточные устройства привода j -го тела, где $j > i$. В общем случае для дополнения ГПТ необходимо сначала параметризовать движущиеся детали привода. Рассмотрим, например, параметризацию деталей электропривода МР, вращающихся вокруг своих осей симметрии. Такие детали будем называть роторами. К ним относятся роторы электродвигателей (ЭД), валы, зубчатые колеса (шестерни), шкивы и другие элементы ЭД, редукторов, соединительных муфт и других конструктивных элементов приводов и передаточных устройств. ЦК этих элементов дополняют ЦК моделей тел. Для этого после ЦК модели i -го тела [1] достаточно записать ЦК роторов, расположенных на i -м теле, т. е. числовые значения следующих параметров:

$$-j, r, h, a, b, c, x, y, z, q, \rho,$$

где j – номер привода; r, h – радиус и высота ротора привода; a, b, c, x, y, z, q – параметры положения ротора; ρ – усредненная плотность распределения массы ротора. Для учета податливости, люфтов, гистерезиса и других физических особенностей конструкций приводов рассмотренный ЦК расширяется. Правила и способы такого расширения определяются возможностями идентификации таких параметров, а также их программной реализации. Учет вращающихся осесимметричных тел привода в УД МР рассмотрен в монографии [21].

Важно отметить, что параметры, описывающие свойства подсистем МР, расположенных на теле, формируются и хранятся (до востребования) в экземплярах соответствующих прототипов или в полях узла <Script>. Например, Параметры Электропривода k -го тела формируются и хранятся в экземпляре прототипа "проПЭП", вложенного в УТ(k).

Если параметр описывает свойство МР в целом, например, набор Собственных Частот колебаний МР (в заданном положении руки), то экземпляр прототипа "проПСЧ" должен быть вложен в УТ(0) или в любой другой групповой узел, например, узел <Group>, вложенный в текущую сцену. При этом коэффициенты жесткости и демпфирования, приведенные к осям вращения тел ВКП и необходимые для вычисления ПСЧ МР, должны формироваться и храниться в прототипе "проВКП", экземпляры которого вкладываются в УТ тел.

Рассмотрим варианты параметризации следующего адаптивного ПИД-регулятора ЗДТ:

$$M(t, q, \dot{q}) = K_p(q)x + K_d(q)\dot{x} + K(t, q, \dot{q}), \quad (12)$$

где $M(t, q, \dot{q})$ – вектор-столбец шести движущих моментов сил, приведенных к осям вращения тел МР (далее все векторы имеют шесть компонент); t – текущее время; q – вектор-строка углов относительных поворотов тел; $\dot{q}$ – вектор-строка относительных угловых скоростей тел; $K_p(q) = H(q)B$ – квадратная (6×6) матрица коэффициентов усиления пропорциональной части регулятора; $x = q_p(t) - q^T$ – вектор-столбец ошибок управления углами поворота тел; $K_d(q) = H(q)A$ – квадратная (6×6) матрица коэффициентов усиления дифференциальной части регулятора; $\dot{x} = \dot{q}_p(t) - \dot{q}^T$ – вектор-столбец ошибок управления угловыми скоростями тел; $K(t, q, \dot{q}) = H(q)\ddot{q}_p + h(q, \dot{q})$ – вектор-столбец интегральной части регулятора; $q_p(t)$ – вектор-столбец программных (заданных) вращений тел; $\dot{q}_p(t)$ – вектор-столбец программных скоростей вращений тел; $\ddot{q}_p(t)$ – вектор-столбец программных ускорений вращений тел; $H(q)$ – квадратная (6×6) Матрица Инерционных Коэффициентов (МИК) МР; A, B – квадратные (6×6) матрицы постоянных коэффициентов, описывающие качество управления; $h(q, \dot{q})$ – вектор-столбец сумм моментов сил тяжести, центробежных и кориолисовых инерционных сил, приведенных к осям вращения тел. МИК и вектор $h(q, \dot{q})$ являются составляющими УД МР, представленных в следующем векторно-матричном виде

$$H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = M. \quad (13)$$

Всегда можно подобрать матрицы A и B так, что элементы $x_{pi}(t)$ вектора x изменяются по гра-

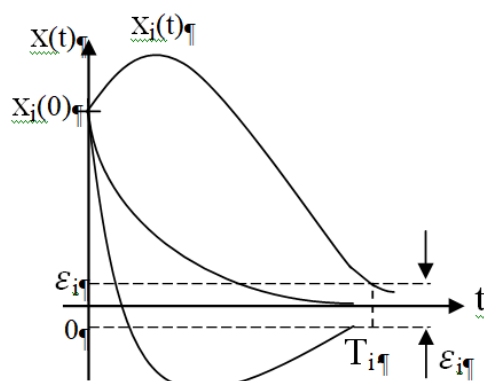


Рис. 5. Графики изменения ошибок управления
Fig. 5. Graphs of control error changes

фикам на рис. 5, где ϵ_i , T_i – параметры, задающие качество управления i -м телом. Действительно, замкнем УД (13) управлением (12). Тогда получим

$$H\ddot{q} + h = K_p x + K_d \dot{x} + K = HBx + HA\dot{x} + H\ddot{q}_p + h.$$

После сокращения вектора h получим

$$H\ddot{q} = HBx + HA\dot{x} + H\ddot{q}_p.$$

МИК является положительно определенной. Поэтому после умножения последнего равенства слева на матрицу H^{-1} получим

$$\ddot{q}_p - \ddot{q} + A\dot{x} + Bx = \ddot{x} + A\dot{x} + Bx = 0.$$

Таким образом, для вектор-столбца ошибок управления имеем следующую систему линейных однородных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\ddot{x} + A\dot{x} + Bx = 0.$$

В этой системе матрицы постоянных коэффициентов A и B всегда можно подобрать так, чтобы ошибки управления $x_{pi}(t)$ изменялись по представленным графикам с заданными параметрами ϵ_i , T_i [9].

Из формулы (12) ПИД-регулятора ЗДТ видно, что коэффициенты при пропорциональной и дифференциальной части регулятора зависят от углов поворота тел, а интегральная часть зависит еще и от заданных угловых ускорений тел и текущего времени, так как выражение интегральной части регулятора содержит $\ddot{q}_p(t)$. Таким образом, ПИД-регулятор (12) адаптируется к состоянию тел и программному ускорению в текущий момент времени.

Если в приводах тел МР используются электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением, то $M_i = k_i I_i$, где M_i – i -я компонента вектор-столбца M , k_i, I_i – коэффициент противо-ЭДС и ток якорной обмотки. Для формирования и хранения перечисленных параметров вводится в обращение и использование прототип Параметров Адаптивного Регулятора "проПАР" или расширяется интерфейсная часть узла <Script> соответствующими полями. Для параметров датчиков (угла поворота, угловой скорости) и электронных блоков (усилителей мощности, стабильных источников тока, управляемых кодами и т. д.) системы управления можно ввести в обращение и использовать X3D-прототип цифровых Параметров Системы Управления "проПСУ" или дополнить интерфейсную часть узла <Script> соответствующими полями.

Для параметризации древовидных систем тел с динамически замыкаемыми и размыкаемыми ветвями, например, для шагающих аппаратов и машин, места размещения постоянных и переменных (динамических) параметров могут быть распределены между неподвижным телом (опорной поверхностью), корпусом и телами ног или их базами.

Заключение

Изложенные здесь результаты используются для X3D-прототипирования МР в программной системе «СисТел», предназначенной для цифрового моделирования МР в составе роботизированных технологических комплексов. Предложенные способы формирования данных позволяют инкапсулировать их в разрабатываемый прототип МР. Важно наделить прототип "проМР" такими свойствами, методами и гибкими механизмами расширения, которые позволят ставить и решать не только известные задачи, но и перспективные, например, задачи автоматической самодиагностики и калибровки параметров МР. Существуют и будут ставиться задачи, для решения которых нужны новые знания. В этой связи интерес представляют архитектуры графовых нейронных сетей, в частности, рекуррентные и сверточные графовые нейронные сети [22]. С помощью графовых нейросетей можно решать естественнонаучные задачи. Например, графовые нейросети применяются для моделирования динамики сложных систем, состоящих из тел (твердых и деформируемых) и сплошных сред (жидких и газообразных) и движущихся в гравитационных и электромагнитных полях. Прогнозируя на каждом временном шаге движения каждой частицы таких систем, можно правдоподобно воссоздать динамику всей системы и получить новые знания о законах, управляющих этим движением.

Список литературы

1. X3D-прототипирование моделей тел манипуляционных роботов / А.И. Телегин, Е.В. Гусев, В.Л. Кодкин, В.И. Ширяев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 4. С. 16–30. DOI: 10.14529/ctcr240402
2. Интерфейс X3D-прототипа схвата манипуляционного робота / А.И. Телегин, Г.И. Волович, Е.В. Гусев, С.Г. Пудовкина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 4. С. 43–58. DOI: 10.14529/ctcr250403
3. Механика промышленных роботов: учеб. пособие для вузов. В 3 кн. Кн. 2: Расчет и проектирование механизмов / Е.И. Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов; под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. М.: Высшая школа, 1988. 367 с. ISBN 5-06-001134-8
4. Левина З.М. Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин. М.: Машиностроение, 1971. 264 с.
5. Механика машин: учеб. пособие для вузов / И.И. Вульфсон, М.Л. Ерихов, М.З. Коловский и др.; под ред. Г.А. Смирнова. М.: Высшая школа, 1996. 511 с. ISBN 5-06-002373-7
6. Динамика управления роботами / В.В. Козлов, В.П. Макарычев, А.В. Тимофеев, Е.И. Юревич. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. 336 с.
7. 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.
8. Величенко В.В. Матрично-геометрические методы в механике с приложениями к задачам робототехники. М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 280 с. (Научные основы робототехники).
9. Тимофеев А.В. Управление роботами: учеб. пособие. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 240 с.
10. Колюбин С.А. Динамика робототехнических систем: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 117 с.
11. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961. 824 с.
12. Miyazaki F., Arimoto S. Stability and robustness of some feedback control schemes for robot manipulators // Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers. 1985. Vol. 21, iss. 1. P. 78–83. DOI: 10.9746/sicetr1965.21.78. URL: https://www.researchgate.net/publication/280173366_Stability_and_Robustness_of_Some_Feedback_Control_Schemes_for_Robot_Manipulators.
13. Телегин А.И. Синтез систем твердых тел с заданными свойствами. Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1996. 174 с.
14. Зубов В.И. Аналитическая динамика систем тел: учеб. пособие. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. 344 с.
15. Мельников Г.И. Динамика нелинейных механических и электромеханических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 200 с.
16. Коловский М.З., Слоущ А.В. Основы динамики промышленных роботов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 240 с. (Научные основы робототехники). ISBN 5-02-013893-2.
17. Управление движением механических систем / Е.Я. Смирнов, В.Ю. Павликов, П.П. Щербаков, А.В. Юрков. Л.: Изд-во ЛГУ, 1985. 316 с.
18. 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.
19. Бутенин Н.Ф., Фуфаев Н.А. Введение в аналитическую механику. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 256 с. ISBN 5-02-014221-2.
20. Brutzman D., Daly L. X3D: Extensible 3D graphics for web authors. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007. 472 p. ISBN 978-0-12-088500-8.
21. Телегин А.И. Уравнения математических моделей механических систем. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. 182 с.
22. Мурзин М. В., Куликов И.А., Жукова Н.А. Методы построения графовых нейронных сетей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 10. С. 40–48. DOI: 10.32603/2071-8985-2024-17-10-40-48

References

1. Telegin A.I., Gusev E.V., Kodkin V.L., Shiriaev V.I. X3D prototyping of manipulation robot body models. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(4):16–30. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240402

2. Telegin A.I., Volovich G.I., Gusev E.V., Pudovkina S.G. Interface of the X3D prototype of the manipulative robot grip. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(4):43–58. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250403
3. Vorob'yev E.I., Egorov O.D., Popov S.A., Frolov K.V., Vorob'yev E.I. (Eds.). *Mekhanika promyshlennykh robotov: ucheb. posobiye dlya vtuzov. V 3 kn. Kn. 2: Raschet i proyektirovaniye mekhanizmov* [Mechanics of industrial robots: A textbook for universities. In 3 books. Book 2: Calculation and design of mechanisms]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1988. 367 p. (In Russ.) ISBN 5-06-001134-8.
4. Levina Z.M., Reshetov D.N. *Kontaktnaya zhestkost' mashin* [Contact stiffness of machines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1971. 264 p. (In Russ.)
5. Vul'fon I.I., Erikhov M.L., Kolovskiy M.Z. et al.; Smirnov G.A. (Ed.). *Mekhanika mashin: ucheb. posobie dlya vtuzov*. [Mechanics of machinery: A textbook for universities]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1996. 511 p. (In Russ.) ISBN 5-06-002373-7.
6. Kozlov V.V., Makarychev V.P., Timofeev A.V., Yurevich E.I. *Dinamika upravleniya robotami* [Dynamics of robot control]. Moscow: Nauka Publ. Main editorial board of physics and mathematics literature, 1984. 336 p. (In Russ.)
7. Butyrin S.A. *Razrabotka algoritmov upravleniya manipulyatorom s kompensatsiyey vzaimovliyaniya dvizheniy i programmnoy obespecheniya chislennykh eksperimentov s modelyami robotov na EVM: dis. kand. tekhn. nauk* [Development of algorithms for manipulator control with compensation for the interaction of movements and software for numerical experiments with computer models of robots. Cand. sci. diss.]. Tomsk, 1982. 144 p. (In Russ.)
8. Velichenko V.V. *Matrichno-geometricheskie metody v mekhanike s prilozheniyami k zadacham robototekhniki* [Matrix-geometric methods in mechanics with applications to robotics problems]. Moscow: Nauka Publ. Main editorial board of physics and mathematics literature, 1988. 280 p. (In Russ.)
9. Timofeev A.V. *Upravlenie robotami: ucheb. posobie* [Robot control: A textbook]. Leningrad: Leningrad State University Publ., 1986. 240 p. (In Russ.)
10. Kolyubin S.A. *Dinamika robototekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie* [Dynamics of robotic systems: a textbook]. St. Petersburg: ITMO University, 2017. 117 p. (In Russ.)
11. Lur'e A.I. *Analiticheskaya mekhanika* [Analytical Mechanics]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1961. 824 p. (In Russ.)
12. Miyazaki F., Arimoto S. Stability and robustness of some feedback control schemes for robot manipulators. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*. 1985;21(1):78–83. DOI: 10.9746/sicetr1965.21.78. Available at: https://www.researchgate.net/publication/280173366_Stability_and_Robustness_of_Some_Feedback_Control_Schemes_for_Robot_Manipulators.
13. 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.)
14. Zubov V.I. *Analiticheskaya dinamika sistem tel: ucheb. posobie* [Analytical dynamics of body systems: A Textbook]. Leningrad: Leningrad State University Publ., 1983. 344 p. (In Russ.)
15. Mel'nikov G.I. *Dinamika nelineynykh mekhanicheskikh i elektromekhanicheskikh sistem* [Dynamics of nonlinear mechanical and electromechanical systems]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1975. 200 p. (In Russ.)
16. Kolovskiy M.Z., Sloushch A.V. *Osnovy dinamiki promyshlennykh robotov* [Fundamentals of industrial robot dynamics]. Moscow: Nauka Publ. Main editorial board of physics and mathematics literature, 1988. 240 p. (In Russ.) ISBN 5-02-013893-2.
17. Smirnov E.Ya., Pavlikov V.Yu., Shcherbakov P.P., Yurkov A.V. *Upravlenie dvizheniem mekhanicheskikh sistem* [Motion control of mechanical systems]. Leningrad: Leningrad State University Publ., 1985. 316 p. (In Russ.)
18. Telegin A.I. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki sistem tel. S prilozheniyami v robototekhnike: uchebnoe posobie dlya vtuzov* [Fundamentals of theoretical mechanics of body systems. With applications in robotics: A textbook for universities]. St. Petersburg: Lan Publ., 2023. 252 p. (In Russ.) ISBN 978-5-507-45089-3.
19. Butenin N.F., Fufaev N.A. *Vvedenie v analiticheskuyu mekhaniku* [Introduction to Analytical Mechanics]. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: Nauka Publ. Main editorial board of physics and mathematics literature, 1991. 256 p. (In Russ.) ISBN 5-02-014221-2.

20. Brutzman D., Daly L. *X3D: Extensible 3D graphics for web authors*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007. 472 p. ISBN 978-0-12-088500-8.

21. Telegin A.I. *Uravneniya matematicheskikh modeley mekhanicheskikh sistem* [Equations of mathematical models of mechanical systems]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 1999. 182 p. (In Russ.)

22. Murzin M. V., Kulikov I. A., Zhukova N. A. Methods for Constructing Graph Neural Networks. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2024;17(10):40–48. DOI: 10.32603/2071- 8985-2024-17-10-40-48

Информация об авторах

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

Волович Георгий Иосифович, д-р техн. наук, проф., главный специалист, ООО «Челэнерго-прибор», Челябинск, Россия; g_volovich@mail.ru.

Гусев Евгений Васильевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры цифровой экономики и информационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gusevev@susu.ru.

Ширяев Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой систем автоматического управления, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shiriaevvi@susu.ru.

Пудовкина Светлана Геннадьевна, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры прикладной математики и ракетодинамики, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия; pudovkinasg@susu.ru.

Information about the authors

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

Georgiy I. Volovich, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Specialist, LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia; g_volovich@mail.ru.

Evgeny V. Gusev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Digital Economics and Information Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gusevev@susu.ru.

Vladimir I. Shiryaev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automatic Control Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shiriaevvi@susu.ru.

Svetlana G. Pudovkina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Applied Mathematics and Rocket Dynamics, South Ural State University, Miass, Russia; pudovkinasg@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 19.12.2025

The article was submitted 19.12.2025

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ УКЛОНЕНИЙ ГОРНО-ВЫЕМОЧНОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРАЦИИ ДАННЫХ БОРТОВЫХ ДАТЧИКОВ РАССТОЯНИЯ

А.В. Затонский¹, zxenon@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>
Н.О. Сергеев², nikitosserg5@gmail.com

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Березниковский филиал, Березники, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

Аннотация. Добыча калийной руды сопряжена с высокими рисками, ключевым из которых является нарушение целостности водозащитной толщи из-за отклонения горно-выемочных машин от проектного курса. **Цель исследования** заключается в разработке метода точной идентификации уклонений горно-выемочной машины в режиме реального времени для обеспечения эффективной и безопасной подземной добычи. **Материалы и методы.** В качестве исходных данных использованы показания четырех бортовых датчиков расстояния, установленных перпендикулярно оси движения комбайна. Расстояние между осями передних и задних датчиков – 8 м, ширина проходки – 5,1 м. Для подавления шумов, вызванных вибрацией и пылью, выполнено сравнение трех алгоритмов фильтрации данных: робастного фильтра Калмана, двухэтапного фильтра (медианный Hampel + Калман) и модельно-ориентированного расширенного фильтра Калмана (EKF). Эффективность фильтрации оценивалась по коэффициенту сглаживания. На основе отфильтрованных данных построена геометрическая модель для расчета курсового угла и восстановления траектории движения комбайна. Точка начала уклонения от прямолинейного курса определялась по критерию устойчивого выхода параметров за пределы 3σ . **Результаты.** Установлено, что лучшие результаты показал метод двухэтапной фильтрации «Hampel + Калман» (средний коэффициент сглаживания 0,8528). На основании отфильтрованных данных восстановлена траектория движения горно-выемочной машины, определен момент начала уклонения от прямолинейного курса на расстоянии 8,925 м от начальной точки. **Заключение.** Предложенный метод фильтрации и геометрического моделирования позволяет идентифицировать отклонения горно-выемочной машины от заданной траектории, но характеризуется накоплением ошибки (дрейфом) при последовательном восстановлении траектории движения и имеет допущение о постоянной скорости. Для устранения систематических погрешностей в дальнейшем предусмотрено объединение фильтра с нейросетевым корректирующим модулем, обученным на имитационной модели движения, а также использование механизма коррекции по одометрическим данным для периодического сброса накопленной ошибки.

Ключевые слова: калийная шахта, горно-выемочная машина, позиционирование, навигация, уклонение от курса, фильтрация данных, фильтр Калмана, фильтр Хампеля, датчики расстояния, обработка сигналов, восстановление траектории

Для цитирования: Затонский А.В., Сергеев Н.О. Метод идентификации уклонений горно-выемочной машины на основе фильтрации данных бортовых датчиков расстояния // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 3. С. 46–55. DOI: 10.14529/ctcr260304

METHOD FOR IDENTIFYING DEVIATIONS OF A MINING MACHINE BASED ON FILTERING OF DATA FROM ONBOARD DISTANCE SENSORS

A.V. Zatonskiy¹, z xenon@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

N.O. Sergeev², nikitosserg5@gmail.com

¹ Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. Potash ore mining is associated with high risks, the key of which is the violation of the integrity of the water-resistant stratum due to the deviation of mining machines from the design course. **Aim.** The aim of the study is to develop a method for accurately identifying deviations of a mining machine in real time to ensure efficient and safe underground mining. **Materials and Methods.** The initial data used were readings from four onboard distance sensors installed perpendicular to the axis of the combine's movement. The distance between the axes of the front and rear sensors is 8 m, and the excavation width is 5.1 m. To suppress noise caused by vibration and dust, three data filtering algorithms were compared: a robust Kalman filter, a two-stage filter (median Hampel + Kalman), and a model-oriented extended Kalman filter (EKF). Filtering efficiency was assessed using the smoothing coefficient. Based on the filtered data, a geometric model was constructed to calculate the heading angle and reconstruct the combine's movement trajectory. The starting point of deviation from the straight-line course was determined by the criterion of stable parameter exit beyond the 3σ limits. **Results.** It was found that the two-stage filtering method "Hampel + Kalman" showed the best results (average smoothing coefficient of 0.8528). Based on the filtered data, the movement trajectory of the mining machine was reconstructed, and the moment of deviation from the straight-line course was determined at a distance of 8.925 m from the starting point. **Conclusion.** The proposed method of filtering and geometric modeling allows identifying deviations of the mining machine from the specified trajectory but is characterized by error accumulation (drift) during sequential trajectory reconstruction and assumes a constant speed. To eliminate systematic errors, future work involves combining the filter with a neural network correcting module trained on a simulation model of movement, as well as using a correction mechanism based on odometric data for periodic reset of accumulated error.

Keywords: potash mine, mining machine, positioning, navigation, course deviation, data filtering, Kalman filter, Hampel filter, distance sensors, signal processing, trajectory reconstruction

For citation: Zatonskiy A.V., Sergeev N.O. Method for identifying deviations of a mining machine based on filtering of data from onboard distance sensors. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(3):46–55. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260304

Введение

Добыча калийной руды, несмотря на высокий уровень механизации, остается одним из самых сложных и рискованных видов горных работ. Основные трудности носят геологический, технологический и экологический характер.

К геологическим сложностям относятся глубокое залегание пластов (работы ведутся на глубине 200–450 м), ползучесть и пластичность солей, что требует высоких скоростей проходки, быстрого возведения крепи, качественной закладки выработанного пространства. Пласты имеют переменную мощность, прослой пустой породы (галита), изменение состава. Это приводит к колебаниям содержания KCl в руде, непредсказуемым условиям отбойки, риску водопритока. Над солевой толщей залегают водоносные горизонты. Главная катастрофическая опасность для калийной шахты – прорыв напорных вод в выработки через тектонические нарушения или из-за разгерметизации ствола, что может привести к затоплению шахты.

К технологическим сложностям можно отнести ограниченность пространства. Работы ведутся в стесненных подземных условиях. Солевая пыль и влага вызывают коррозию металлических частей оборудования, ускоренный износ движущихся узлов и режущего инструмента комбайна.

Требования безопасной отработки калийных пластов включают в себя обязательное сохранение целостности водозащитной толщи (ВЗТ), что достигается использованием камерных систем разработки с межкамерными целиками. Ключевым условием поддержания устойчивости таких систем является обеспечение проектной мощности целиков и соосности проходимых камер. Одной из основных технологических проблем, препятствующих выполнению этого условия, является отклонение горно-выемочной машины (ГВМ) от заданного курса. Данное отклонение ведет к нарушению геометрических параметров целиков, снижению устойчивости кровли и возрастанию риска обрушения.

Обзор существующих подходов к позиционированию

Условия подземных горных работ, такие как отсутствие GPS, затухание сигнала, пыль, влажность, приводят к невозможности использования для позиционирования традиционных методов FRID, Wi-Fi, ZigBee. Современные методы, как отмечается в работе [1], также имеют определенные ограничения. Сверхширокополосная связь UWB устойчива к многолучевому распространению, имеет высокую точность (до 10–30 см), но требует плотной инфраструктуры и синхронизации. Инерционные системы INS не зависят от внешних сигналов, но подвержены дрейфу. Магнитометрия чувствительна к изменениям металлической среды. LIDAR и визуальное позиционирование VIO имеют высокую точность, но дорогие с точки зрения оснащения и требовательны к вычислениям. Наиболее перспективными признаны гибридные методы, сочетающие несколько технологий. Авторы работы считают, что будущее за интеллектуальными, адаптивными системами, сочетающими сенсоры, искусственный интеллект, цифровые двойники шахт.

Разработка гибридных систем навигации активно развивается. В частности, для позиционирования комбайна в шахте авторами работы [2] предложена комбинация машинного зрения и оптоволоконной инерциальной навигации с последующим слиянием данных через фильтр Калмана. В работе [3] предложен метод определения пространственного положения комбайна по двум векторам: вектору гравитации (измеряется двухосевым инклинометром) и вектору света, который задается направлением указательного лазера, установленного в забое. В отличие от работ [2, 3], где используются визуальные методы, в работе [4] реализована плотно связанная LiDAR-инерционная одометрия с двухэтапной фильтрацией исходного облака точек и факторным графом iSAM2. Экспериментальное сравнение системы с аналогами показало превосходство метода в узких и пыльных тоннелях, где улучшение по RSME достигает 50–92 %. Авторы работы [5] предложили многоуровневый пайплайн, реализующий принцип восстановления движения «от грубого к точному», разработали механизм автоматического обхода деградировавших сенсоров. Это позволило системе сохранять работоспособность даже при частичном отказе сенсоров.

Отдельные исследования посвящены традиционным методам: в работе [6] на примере испытаний в шахте Bogunia (Польша) показана высокая точность гироскопического ориентирования. Оценка точности показала случайную погрешность единичного гироскопического измерения в среднем не более 18 угловых секунд. В статье [7] в реальной шахте испытана UWD-система. Для реализации метода авторами разработана электронная плата на базе чипа DW1000 с микроконтроллером STM32. Для определения положения использована позиционно-скоростная модель с расширенным фильтром Калмана. Результаты показали, что на большинстве участков ошибки локализации не превысили 1 м, но на перекрестке штреков ошибка возростала.

Особого внимания требуют проблемы автономности и накопления ошибок дрейфа в инерциальных системах. Специалисты Горного института УрО РАН разработали систему курсовой навигации для комбайна «Урал-20Р» с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) с кольцевыми лазерными гироскопами ГЛ-300 [8]. Предварительно были проведены успешные наземные испытания [9], что позволило перейти опытно-промышленным испытаниям. В дальнейших исследованиях авторы планируют дополнительную систему коррекции, основанную на датчике пройденного пути.

В современных исследованиях в области навигации ключевой проблемой остается обеспечение высокой точности оценки положения и ориентации при использовании недорогих инерциальных блоков (IMU). В [10] предложено подавление шумов недорогих IMU с помощью свер-

точной нейросети с дилатированными свертками, а в [11] – алгоритм на основе одного 9-осевого IMU без внешних опорных сигналов и обучающих моделей, с детекцией неподвижного состояния, не зависящий от внешней инфраструктуры.

Исследования в области 3D-картографирования шахт с помощью воздушного лазерного сканирования дают эталонные данные, необходимые для валидации моделей восстановления траекторий. В работе [12] подчеркивается необходимость стандартизации атрибутивного наполнения 3D-моделей. В [13] предложено представление карты на основе сегментации точечных облаков и использования обучаемых дескрипторов. Работа демонстрирует синергетический подход к представлению пространственных данных: единый компактный дескриптор одновременно решает задачи локализации, реконструкции и семантической интерпретации. В [14] систематизированы принципы количественной оценки траекторий для визуальной и визуально-инерциальной одометрии. Авторами показано, что тип преобразования для выравнивания оценочной и эталонной траекторий должен строго соответствовать сенсорной конфигурации системы. Неправильный выбор стратегии выравнивания может исказить ошибку более чем на 150 %. В работе проанализированы метрики абсолютной (ATE) и относительной (RE) ошибки траектории.

В исследовании [15] создана имитационная модель движения горно-выемочной машины (ГВМ), подтверждена возможность качественной идентификации уклонов по данным четырех датчиков расстояния, установленных на бортах комбайна и направленных перпендикулярно ее оси. Авторы отмечают, что применение искусственного интеллекта в системах позиционирования ГВМ является не просто технологическим улучшением, а стратегической необходимостью для повышения безопасности, эффективности и конкурентоспособности горнодобывающих предприятий в условиях цифровой трансформации отрасли.

1. Фильтрация данных

Рассмотренные гибридные системы позиционирования требуют сложной настройки и высокой вычислительной мощности. Для оперативного контроля положения комбайна можно использовать более простые методы. В данном исследовании решается задача восстановления траектории движения комбайна, определения точки начала уклона и угла уклона по данным четырех бортовых датчиков расстояния математическими методами. Поступающие показания датчиков расстояния сильно зашумлены из-за внешних воздействий (пыль и вибрация). Поэтому на первом этапе решается задача фильтрации показаний четырех датчиков, установленных на комбайне: два на передней оси и два на задней оси, база между осями $B = 8$ м. Датчики измеряют расстояния до стенок проходки: d_{Lf} , d_{Lr} , d_{Rf} , d_{Rr} . Ширина проходки $W = 5,1$ м. Скорость движения считаем постоянной $V = 0,3$ м/мин. Период опроса датчиков $dt = 0,25$ мин. На рис. 1 показана схема расположения датчиков.

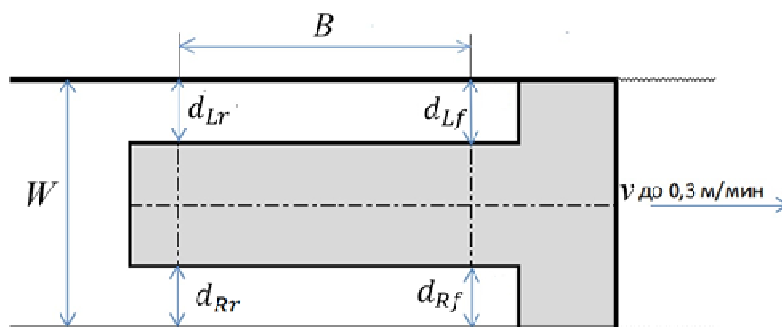


Рис. 1. Расположение датчиков расстояния на комбайне (вид сверху)
Fig. 1. Arrangement of distance sensors on the mining machine (top view)

Экспериментальным образом получены по 1500 значений расстояний от каждого датчика до стенки проходки. За критерий фильтрации принята физическая правдоподобность результатов. Используются следующие методы фильтрации: робастный фильтр Калмана, при котором каждый из четырех датчиков обрабатывается отдельно; двухэтапный робастный фильтр Hampel-фильтр + фильтр Калмана и модельно-ориентированный фильтр EKF по состоянию $[y, \varphi]$.

Для оценки подавления шумовой компоненты применен коэффициент сглаживания, который показывает долю подавленной высокочастотной шумовой составляющей:

$$k = 1 - \frac{\sigma(\Delta y_{\text{фильтр}})}{\sigma(\Delta y_{\text{исх}})},$$

где $\Delta y_i = y_i - y_{i-1}$ – первая разность (оценка высокочастотной составляющей); $\sigma(\Delta y)$ – средне-квадратическое отклонение этих разностей; $y_{\text{исх}}$ – исходный сигнал; $y_{\text{фильтр}}$ – отфильтрованный сигнал.

Ниже приведены сравнительные графики для каждого датчика. По оси Ox отложено расстояние комбайна вдоль движения, по оси Oy – расстояние от датчика до соответствующей боковой стенки проходки.

На рис. 2 показано сравнение фильтрации для левого переднего датчика dLf робастным фильтром Калмана (Robust KF), двухэтапным фильтром: медианный фильтр Hampel + фильтр Калмана (Hampel + KF), модельно-ориентированным фильтром ЕKF по состоянию $[y, \varphi]$.

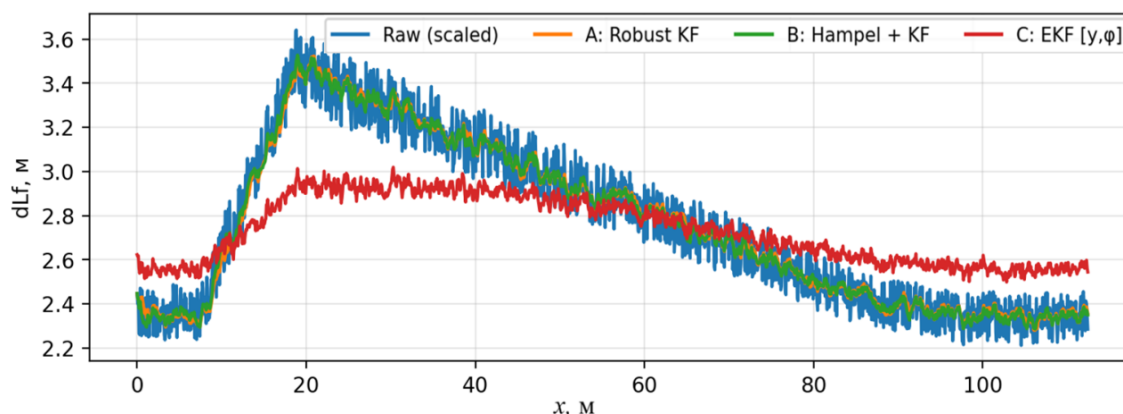


Рис. 2. Сравнение фильтрации для левого переднего датчика dLf: Raw (scaled) – исходные данные; A: Robust KF – робастный фильтр Калмана; B: Hampel + KF – медианный фильтр Хампеля + фильтр Калмана; C: EKF $[y, \varphi]$ – модельно-ориентированный фильтр ЕKF по состоянию $[y, \varphi]$

Fig. 2. Comparison of filtering for the left front sensor dLf: Raw (scaled) – raw data; A: Robust KF – robust Kalman filter; B: Hampel + KF – Hampel median filter + Kalman filter; C: EKF $[y, \varphi]$ – model-oriented extended Kalman filter for state $[y, \varphi]$

На рис. 3–5 показано сравнение фильтрации для остальных трех датчиков вышеперечисленными методами.

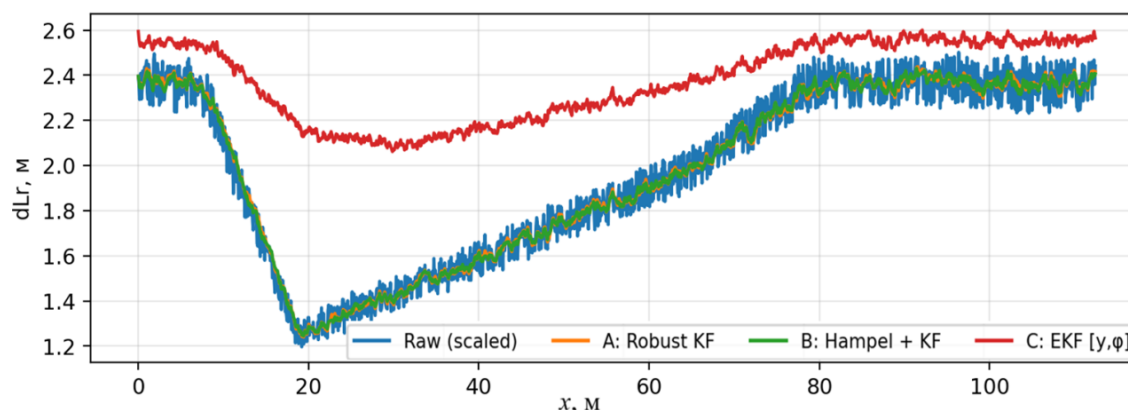


Рис. 3. Сравнение фильтрации для левого заднего датчика dLr: Raw (scaled) – исходные данные; A: Robust KF – робастный фильтр Калмана; B: Hampel + KF – фильтр Хампеля + фильтр Калмана; C: EKF $[y, \varphi]$ – модельно-ориентированный фильтр ЕKF

Fig. 3. Comparison of filtering for the left rear sensor dLr: Raw (scaled) – raw data; A: Robust KF – robust Kalman filter; B: Hampel + KF – Hampel filter + Kalman; C: EKF $[y, \varphi]$ – model-oriented extended Kalman filter

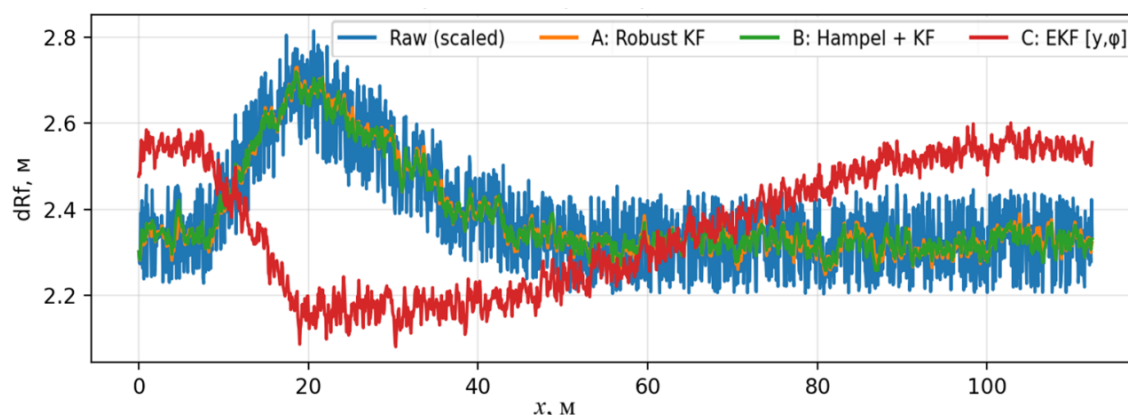


Рис. 4. Сравнение фильтрации для правого переднего датчика dRf: Raw (scaled) – исходные данные; A: Robust KF – робастный фильтр Калмана; B: Hampel + KF – фильтр Хампеля + фильтр Калмана; C: EKF [y, φ] – модельно-ориентированный фильтр EKF

Fig. 4. Comparison of filtering for the right front sensor dRf: (Raw (scaled) – raw data; A: Robust KF – robust Kalman filter; B: Hampel + KF – Hampel filter + Kalman; C: EKF [y, φ] – model-oriented extended Kalman filter

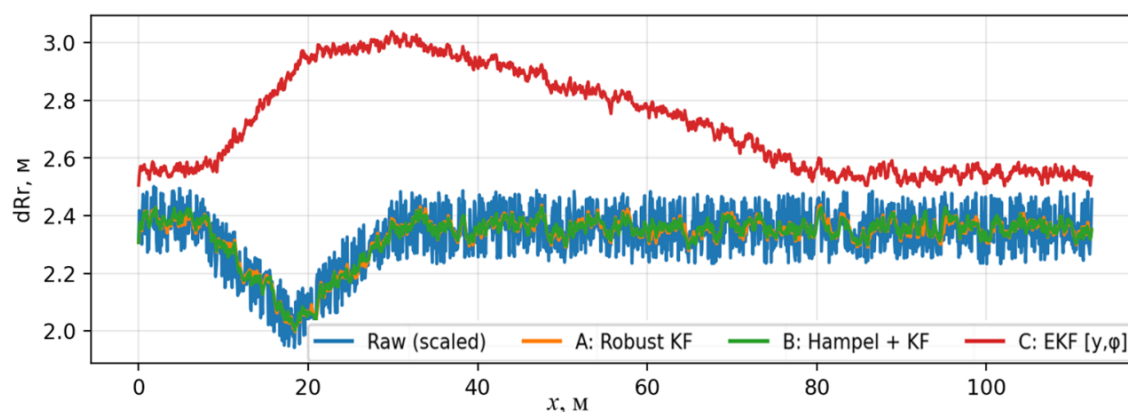


Рис. 5. Сравнение фильтрации для правого заднего датчика dRr: Raw (scaled) – исходные данные; A: Robust KF – робастный фильтр Калмана; B: Hampel + KF – фильтр Хампеля + фильтр Калмана; C: EKF [y, φ] – модельно-ориентированный фильтр EKF

Fig. 5. Comparison of filtering for the right rear sensor dRr: (Raw (scaled) – raw data; A: Robust KF – robust Kalman; B: Hampel + KF – Hampel filter + Kalman; C: EKF [y, φ] – model-oriented EKF

В таблице приведены коэффициенты сглаживания по каждому датчику и усредненные значения по использованным методам.

Коэффициенты сглаживания по методам фильтрации
Smoothing coefficients for filtering methods

Датчик	Robust KF	Hampel + KF	EKF [y, φ]
dLf	0,8623	0,8513	0,8028
dLr	0,8361	0,8519	0,8442
dRf	0,8538	0,8561	0,7781
dRr	0,8438	0,8517	0,8595
Среднее	0,8490	0,8528	0,8211

Несмотря на то, что коэффициент сглаживания, полученный при использовании метода фильтрации EKF [y, φ], высокий, кривая данных, полученных по этому методу, находится достаточно далеко от исходных данных (см. рис. 2–5). Это происходит потому, что в отличие от других методов метод EKF [y, φ] фильтрует не сам датчик сигнала, а модель состояния $x = \begin{bmatrix} y \\ \varphi \end{bmatrix}$, констатирует наиболее вероятное положение комбайна. В нашем случае он хорошо убрал шум ($k = 0,8211$), но при этом подогнал траекторию под физически возможное движение комбайна.

По среднему коэффициенту сглаживания лучшим оказался метод Hampel + KF. Этот метод обеспечивает наибольшее подавление выбросов (за счет медианного этапа) при сохранении плавного поведения фильтрованного сигнала.

2. Геометрическая модель: смещение и курс

По отфильтрованным расстояниям вычислены угол рыскания комбайна и определены его координаты в точках получения сигналов от датчиков.

Для определения курсового угла использована формула

$$\varphi = \arctg \frac{(d_{Rf} - d_{Rr}) + (d_{Lf} - d_{Lf})}{2B}.$$

Траектория восстанавливается интегрированием курса:

$$x_{k+1} = x_k + dS \cdot \cos\varphi;$$

$$y_{k+1} = y_k + dS \cdot \sin\varphi.$$

При восстановлении траектории движения комбайна для сглаживания данных датчиков расстояния применен двухэтапный робастный фильтр Hampel-фильтр (умная медиана) + фильтр Калмана (Hampel + KF). Восстановленная траектория показана на рис. 6.

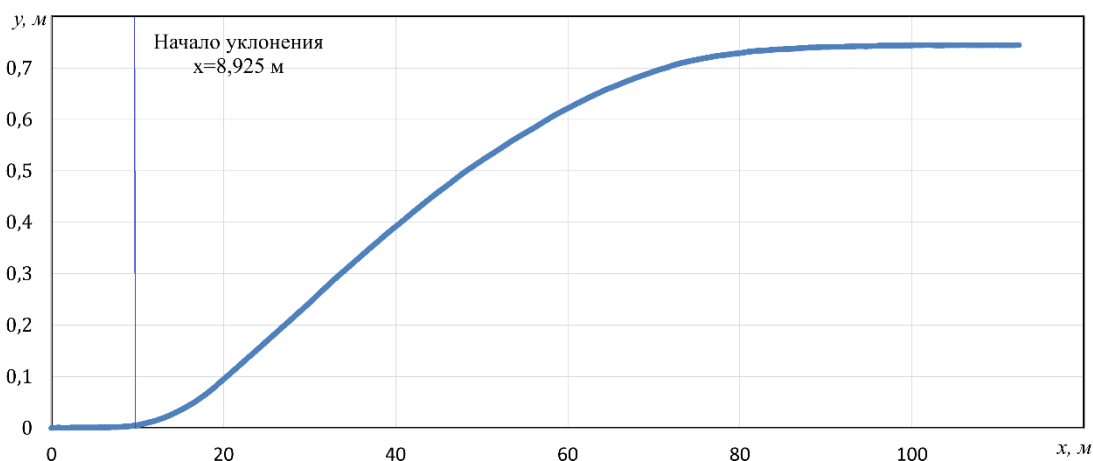


Рис. 6. Траектория $y(x)$, восстановленная по данным, отфильтрованным по методу Hampel + KF
Fig. 6. Trajectory $y(x)$ reconstructed from data filtered using the Hampel + KF method

3. Определение точки начала уклонения от прямолинейной траектории

Начало уклонения определялось по критерию устойчивого выхода параметра φ за пределы 3σ относительно стартового участка (первые 100 измерений). Условие считалось выполненным, если превышение наблюдалось не менее 10 измерений подряд.

Порог 3σ выбран на основе правила трех сигм, согласно которому при нормальном распределении случайных ошибок 99,7 % результатов обнаруживаются в пределах $\pm 3\sigma$, т. е. если параметр устанавливается за пределы 3σ , это значит, что на начало отклонения траектории движения комбайна не влияет случайное измерение шума.

Среднеквадратическое отклонение σ рассчитано по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2},$$

где x_i – значения y_i или φ_i ; $\bar{x}$ – их среднее значение на участке установившегося движения; N – число отсчетов.

Начало уклонения зафиксировано на индексе 119 ($t \approx 29,75$ мин), что соответствует расстоянию вдоль оси Ox около 8,925 м от начала движения (см. рис. 6).

Заключение

Реализованы три подхода к подавлению шума в данных датчиков расстояния: робастный фильтр Калмана, Hampel + Калман и модельно-ориентированный EKF по состоянию $[y, \varphi]$.

По критерию k (коэффициент сглаживания) лучшим оказался метод двухэтапного робастного фильтра Hampel-фильтр (умная медиана) + фильтр Калмана ($k_{cp} = 0,8528$).

По данным, сглаженным фильтром Hampel + KF, восстановлены траектория $y(x)$, обнаружено начало уклонения на расстоянии $x = 8,925$ м.

Рассмотренный метод восстановления траектории по отфильтрованным данным имеет ряд недостатков. Существующие методы измерения расстояний до стен шахтной выработки сталкиваются с рядом возможных помех, таких как шероховатость и неровность поверхности, загрязнение датчиков, вибрация от оборудования. Применение фильтров позволяет частично сгладить эти отклонения и повысить стабильность расчета угла отклонения, однако полностью устранить погрешности измерения не представляется возможным.

Дополнительной проблемой является накопление ошибок позиционирования. При последовательном вычислении координат комбайна на основе измеренного угла и пройденного пути даже небольшие неточности со временем суммируются, что приводит к значительному отклонению от реального местоположения.

При нахождении координат комбайна в заданные моменты времени предполагалось, что скорость комбайна постоянна, что не соответствует реальным условиям эксплуатации. В процессе работы возможно проскальзывание гусеничного хода, оказывающее влияние и на скорость, и на траекторию движения комбайна.

Для решения проблемы дрейфа и повышения надежности системы планируется объединить результаты исследования [15] и полученных результатов. Использование имитационной модели, разработанной в исследовании [15], для обучения нейронной сети поможет повысить точность измерения положения комбайна. Интеграция алгоритмов фильтров с инерциальной навигацией и одометрией позволит применить нейронную сеть в качестве корректирующего звена, использующего данные датчиков расстояния для сброса накопленной ошибки позиционирования.

Список литературы

1. Underground Mine Positioning: A Review / F. Seguel, P. Palacios-Játiva, C.A. Azurdia-Meza et al. // IEEE Sensors Journal. 2022. Vol. 22, no. 6. P. 4755–4771. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3112547
2. Wan J. et al. Vision and Inertial Navigation Combined-Based Pose Measurement Method of Cantilever Roadheader // Sustainability. 2023. Vol. 15, no. 8. P. 4018. DOI: 10.3390/su15054018
3. Huang Z. A multi-vision based pose measurement method for coal mine roadheader // IEEE Sensors Journal. 2025. Vol. 25, no. 19. P. 36906–36914. DOI: 10.1109/jsen.2025.3591429
4. Chen J., Wang H., Yang S. Tightly Coupled LiDAR-Inertial Odometry and Mapping for Underground Environments // Sensors. 2023. Vol. 23 (15). P. 6834. DOI: 10.3390/s23156834
5. Zhang J., Singh S. Laser–visual–inertial odometry and mapping with high robustness and low drift // Journal of Field Robotics. 2018. Vol. 35 (5). P. 1242–1264. DOI: 10.1002/rob.21809
6. Szafarczyk A., Skaba A., Sokalla K. Implementation of gyroscope measurements in underground mines; focus on the mine of ruch (unit) “Borynia” in the Jastrzębie Coal Company // Geoinformatica Polonica. 2019. Vol. 18. P. 113–120. DOI: 10.4467/21995923GP.19.009.11576
7. Development and Evaluation of a UWB–Based Indoor Positioning System for Underground Mine Environments / M. Ziegler, A.E. Kianfar, T. Hartmann, E. Clausen // Mining, Metallurgy & Exploration. 2023. Vol. 40. P. 1021–1040. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42461-023-00797-z> (дата обращения: 22.04.2026).
8. Практический опыт курсовой навигации проходческо-очистного комбайна на калийном месторождении / А.И. Кузнецов, Д.С. Кормщиков, Н.А. Князев, Я.Д. Кузнецов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2024. № 4. С. 685–699.
9. Система навигации проходческо-очистного комбайна на калийных рудниках / Л.Ю. Левин, Д.С. Кормщиков, Е.Г. Кузьминых, А.М. Мачерет // Горный журнал. 2021. № 4. С. 92–96. DOI: 10.17580/gzh.2021.04.13
10. Brossard M., Bonnabel S., Barrau A. Denoising IMU Gyroscopes with Deep Learning for Open-Loop Attitude Estimation // IEEE Robotics and Automation Letters. 2020. Vol. 5, no. 3. P. 4796–4803. DOI: 10.1109/lra.2020.3003256
11. Ding Y., Kim Y., Kim H. A Study on a High-Precision 3D Position Estimation Technique Using Only an IMU in a GNSS Shadow Zone // Sensors. 2025. Vol. 25 (23), P. 7133. DOI: 10.3390/s25237133
12. Повышение качества цифровых «двойников» горнодобывающих предприятий на базе стандартизации атрибутивного наполнения технологических 3D-моделей в ГГИС / Д.А. Стадник,

О.З. Габараев, Н.М. Стадник, К.Л. Григорян // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 11-1. С. 202-212. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-202-212

13. SegMap: segment-based mapping and localization using data-driven descriptors / R. Dube, A. Cramariuc, D. Dugas et al. // The International Journal of Robotics Research. 2019. DOI: 10.1177/0278364919863090

14. Zhang Z., Scaramuzza D. A Tutorial on Quantitative Trajectory Evaluation for Visual(-Inertial) Odometry // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid, Spain, 2018. P. 7244–7251. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593941

15. Затонский А.В., Михалев П.В. Разработка имитационной модели движения горно-выбывочной машины // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19, № 2. С. 166–174. DOI: 10.14529/ctcr190216

References

1. Seguel F., Palacios-Játiva P., Azurdia-Meza C.A. et al. Underground Mine Positioning: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2022;22(6):4755–4771. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3112547

2. Wan J. et al. Vision and Inertial Navigation Combined-Based Pose Measurement Method of Cantelever Roadheader. *Sustainability*. 2023;15(8):4018. DOI: 10.3390/su15054018

3. Huang Z. A multi-vision based pose measurement method for coal mine roadheader. *IEEE Sensors Journal*. 2025;25(19):36906–36914. DOI: 10.1109/jsen.2025.3591429

4. Chen J., Wang H., Yang S. Tightly Coupled LiDAR-Inertial Odometry and Mapping for Underground Environments. *Sensors*. 2023;23(15):6834. DOI: 10.3390/s23156834

5. Zhang J., Singh S. Laser-visual-inertial odometry and mapping with high robustness and low drift. *Journal of Field Robotics*. 2018;35(5):1242–1264. DOI: 10.1002/rob.21809

6. Szafarczyk A., Skaba A., Sokalla K. Implementation of gyroscope measurements in underground mines; focus on the mine of ruch (unit) “Borynia” in the Jastrzębie Coal Company. *Geoinformatica Polonica*. 2019;18:113–120. DOI: 10.4467/21995923GP.19.009.11576

7. Ziegler M., Kianfar A.E., Hartmann T., Clausen E. Development and Evaluation of a UWB-Based Indoor Positioning System for Underground Mine Environments. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2023;40:1021–1040. Available at: <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00797-z> (accessed 22.04.2026).

8. Kuznetsov A.I., Kormshchikov D.S., Knyazev N.A., Kuznetsov Ya.D. Practical experience of course navigation a potash-powered tunneling and cleaning combin the deposit. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*. 2024;(4):685–699. (In Russ.)

9. Levin L.Yu., Kormshchikov D.S., Kuzminykh E.G., Macheret A.M. Navigation system for heading machines in p otash mines Information about authors. *Gornyi zhurnal*. 2021;(4):92–96. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2021.04.13

10. Brossard M., Bonnabel S., Barrau A. Denoising IMU Gyroscopes with Deep Learning for Open-Loop Attitude Estimation. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020;5(3):4796–4803. DOI: 10.1109/lra.2020.3003256

11. Ding Y., Kim Y., Kim H. A Study on a High-Precision 3D Position Estimation Technique Using Only an IMU in a GNSS Shadow Zone. *Sensors*. 2025;25(23):7133. DOI: 10.3390/s25237133

12. Stadnik D.A., Gabaraev O.Z., N.M. Stadnik, Grigoryan K.L. Digital twin quality improvement for mines through standardization of attribute content for 3D GIS-based geotechnical modeling. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(11-1):202–212. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-202-212

13. Dube R., Cramariuc A., Dugas D., Sommer H., Dymczyk M., Nieto J., Siegwart R., Cadena C. SegMap: segment-based mapping and localization using data-driven descriptors. *The International Journal of Robotics Research*. 2019. DOI: 10.1177/0278364919863090

14. Zhang Z., Scaramuzza D. A Tutorial on Quantitative Trajectory Evaluation for Visual(-Inertial) Odometry. In: *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Madrid, Spain, 2018. P. 7244–7251. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593941

15. Zatonskiy A.V., Mikhalev P.V. Design of Imitating Model of Mining Mashine. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2019;19(2):166–174. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190216

Информация об авторах

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

Сергеев Никита Олегович, аспирант кафедры информационных технологий и автоматизированных систем электротехнического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, nikitosserg5@gmail.com.

Information about the authors

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

Nikita O. Sergeev, Postgraduate student of the Department of Information Technology and Automated Systems of the Faculty of Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; nikitosserg5@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 22.04.2026

The article was submitted 22.04.2026

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

Научная статья

УДК 004.9

DOI: 10.14529/ctcr260305

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЭПОХУ ЦИФРОВИЗАЦИИ: ПЕРСОНАЛИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ В ПРЕДМЕТНОМ ОБУЧЕНИИ

Л.С. Тарасова, liebe_perm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1819-4723>

И.Д. Столбова, stolbova.irina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0546-9428>

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

Аннотация. Статья посвящена обоснованию перехода от автоматизации классических образовательных инструментов к внедрению адаптивных образовательных моделей, основанных на интеллектуальных системах управления. Необходимость подобных процессов вызвана условиями перехода к Индустрии 5.0, согласно которой традиционная инженерная подготовка претерпевает фундаментальную трансформацию. **Целью исследования** является разработка и обоснование модели трансформации образовательного процесса в инженерном вузе (на примере геометро-графической подготовки) в условиях тотальной цифровизации. **Материалы и методы.** В работе рассматриваются методы системного анализа, подходы к управлению на основе данных (Data-Driven Management), концепция интеллектуального эдвайзинга и предиктивной аналитики как фундамента сопровождения учебного процесса. **Результаты.** Обоснована роль интеллектуального посредничества ИИ между заданными образовательными нормативами и индивидуальными особенностями студента, а также предложен механизм «живой связи» учебного процесса с реальным сектором экономики через программных агентов. Обсужден функционал цифровых инструментов и приведены примеры их использования при сопровождении процесса геометро-графической подготовки студентов. Практическая ценность работы сосредоточена на совершенствовании внутренней системы высшего учебного заведения. Инструменты интеллектуального эдвайзинга позволяют вузам автоматизировать мониторинг качества обучения, минимизировать риски отсева за счет прогнозирования трудностей студентов и оптимизировать распределение педагогических ресурсов. **Заключение.** Предложенные инструменты интеллектуального эдвайзинга и модели управления могут быть интегрированы в образовательные программы инженерных вузов для повышения качества подготовки специалистов, сокращения периода их адаптации на высокотехнологичном производстве, а также синхронизации планируемых образовательных результатов с запросами цифровой индустрии.

Ключевые слова: цифровая трансформация, инженерное образование, геометро-графическая подготовка, искусственный интеллект, интеллектуальный эдвайзинг, адаптивное управление, цифровой след

Для цитирования: Тарасова Л.С., Столбова И.Д. Интеллектуальное управление в эпоху цифровизации: персонализация и контроль в предметном обучении // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 3. С. 56–67. DOI: 10.14529/ctcr260305

INTELLIGENT MANAGEMENT IN THE ERA OF DIGITALIZATION: PERSONALIZATION AND CONTROL IN SUBJECT-BASED EDUCATION

L.S. Tarasova, liebe_perm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1819-4723>

I.D. Stolbova, stolbova.irina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0546-9428>

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. The article is devoted to substantiating the transition from the automation of classical educational tools to the implementation of adaptive educational models based on intelligent control systems. The need for such processes is caused by the transition to Industry 5.0, which implies a fundamental transformation of traditional engineering education. **The purpose of this research** is to develop and justify a model for transforming the educational process in an engineering university (using the example of geometric and graphic training) in the context of total digitalization. **Materials and methods.** The article explores the methods of system analysis, approaches to data-driven management, and the concept of intelligent advising and predictive analytics as the foundation for supporting the educational process. **Results.** The article substantiates the role of AI's intellectual mediation between the specified educational standards and the individual characteristics of the student, and proposes a mechanism for “live communication” between the educational process and the real sector of the economy through software agents. The article discusses the functionality of digital tools and provides examples of their use in supporting the process of geometric and graphic training for students. The practical value of the work is focused on improving the internal system of a higher education institution. The tools of intelligent advising allow universities to automate the monitoring of the quality of education, minimize the risks of dropout by predicting the difficulties of students, and optimize the distribution of pedagogical resources. **Conclusion.** The proposed tools of intelligent advising and management models can be integrated into the educational programs of engineering universities to improve the quality of training specialists, reduce the period of their adaptation in high-tech production, and synchronize the planned educational results with the demands of the digital industry.

Keywords: digital transformation, engineering education, geometric and graphic training, artificial intelligence, intelligent advising, adaptive management, digital footprint

For citation: Tarasova L.S., Stolbova I.D. Intelligent management in the era of digitalization: personalization and control in subject-based education. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(3):56–67. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260305

Введение

В настоящее время цифровая трансформация образования перешла из стадии внедрения отдельных инструментов в стадию глубокой системной реорганизации. Управление предметным обучением сегодня – это не просто контроль выполнения утвержденной программы, а сложный процесс оркестровки цифровых ресурсов, педагогических технологий и аналитических данных [1].

Традиционные методы управления обучением, опирающиеся на усредненные показатели предметной области, демонстрируют свою неэффективность в условиях стремительного обновления знаний [2]. Без изменения подходов к управлению – от распределения нагрузки до форматов оценивания – цифровые инструменты остаются лишь дорогостоящей надстройкой, не приносящей качественного улучшения образовательных результатов. Интеграция интеллектуальных информационных систем и новых управленческих стратегий позволит трансформировать предметное обучение на основе высокотехнологичной среды развития компетенций.

Цифровая трансформация предполагает сделать процесс обучения прозрачным, гибким и измеримым на каждом этапе [1]. Кроме того, образовательный запрос диктует необходимость перехода к персонализированным моделям, где управление строится на основе предиктивной (прогнозной и предсказательной) аналитики. Аналитический прогноз помогает сфокусироваться не на ошибках, а на их предотвращении. Алгоритм сравнивает текущий «цифровой след» студента и помогает добиться планируемого результата путем корректировки индивидуального плана освоения программы обучения – до фиксации академической неуспеваемости [3].

Сегодня учебный процесс не может сопровождаться только периодическим консультированием – он эволюционирует в «цифровой коучинг» [4]. В рамках современного предметного обучения интеллектуальные агенты и системы мониторинга призваны сопровождать обучающегося в реальном времени, мгновенно реагируя на любые затруднения, а рутинные административные функции управления учебным процессом автоматизируются. Это позволяет сменить парадигму от реактивного управления (исправление ошибок после их совершения) к проактивному сопровождению успеха. Особое место в этой экосистеме занимают инструменты сопровождения, которые обеспечивают непрерывную поддержку как обучаемого, так и преподавателя.

Тотальная цифровизация инженерного образования предполагает использование прогностических моделей формирования инженерных компетенций [5]. В данный момент цифровая трансформация инженерного образования перестала быть вопросом выбора, а стала условием выживания высшей школы в условиях жесткого технологического суверенитета [2]. Особое место в этой трансформации занимает геометро-графическая подготовка (ГГП) – дисциплина, которая первой принимает на себя вызов перехода к бесчертежному производству и проектированию на основе цифровых двойников [6].

В данной статье рассматриваются стратегии управления качеством обучения графическими дисциплинами, которые позволяют подготовить инженера, готового к немедленному включению в высокотехнологичные производственные циклы. Цифровизация ГГП подразумевает не просто замену кульмана на монитор, а создание адаптивной экосистемы, где системы искусственного интеллекта будут сопровождать студента, анализируя траекторию его работы над 3D-моделью, подсказывая оптимальные алгоритмы геометрических построений и предотвращая когнитивные перегрузки.

Новая парадигма управления предметным обучением в инженерном образовании

В настоящее время традиционное линейное планирование («одна программа для всех в едином темпе») становится неэффективным для формирования сложных инженерных компетенций [5]. На смену ему приходит адаптивное управление (Data-Driven Management), базирующееся на анализе больших данных (Big Data) и «цифровом следе» (Digital Footprint) обучающегося в инженерных программных средах.

Среди перспективных механизмов трансформации в инженерном обучении можно выделить следующие:

- **Предиктивное реагирование.** На основе накопленных данных алгоритмы управления (Data-Driven Management) прогнозируют зоны риска [7]. К примеру, в случае, когда аналитика при освоении проективной теории построения изображений выявляет дефицит пространственного воображения у студента при переходе от 2D-эскизов к трехмерным моделям, система превентивно включает в его план корректирующие упражнения с визуализацией или интерактивные VR-тренажеры.

- **Прогнозирование успешности.** На основе данных о работе предыдущих потоков алгоритмы определяют вероятность успешного освоения учебного курса и предлагают превентивные меры (например, дополнительные модули по начертательной геометрии, если западают навыки пространственного воображения).

- **Динамическое изменение сложности заданий.** Система, отслеживая прогресс обучающегося, замечает, что студент быстро справляется с параметризацией типовой детали, и оперативно перестраивается на выполнение задачи повышенной сложности в реальном времени (например, моделирование поверхностей свободной формы) [5].

- **Динамическая декомпозиция учебного плана.** Программа дисциплины имеет жесткую структуру, в свою очередь, адаптивная модель позволяет динамически перераспределять учебные часы в зависимости от фактической скорости усвоения материала. В случае демонстрации опережающего освоения материала по 3D-моделированию студентом или группой система автоматически инициирует переход к более углубленным задачам – например, к анализу кинематики механизмов.

- **Мониторинг проектирования в реальном времени (CAD-аналитика).** Система мониторинга помогает управлять обучением в режиме реального времени посредством глубокой

аналитики работы студента в профессиональной среде. Фиксируя сам процесс, анализирует ход задания:

- *построение дерева модели*: рационально ли выбраны базы и последовательность операций;
- *типичные ошибки*: система выявляет повторяющиеся затруднения при наложении геометрических зависимостей или создании конструктивных элементов детали;
- *поведенческие паттерны*: время, затраченное на решение задачи, и количество обращений к справочной информации.

Применение перечисленных механизмов адаптивного управления превращает процесс предметного обучения из системы «контролера нормативов» в динамический алгоритм управления формированием предметных компетенций. Учебный процесс становится гибким: сильные студенты получают возможность глубокого погружения в проектную деятельность, а студенты, испытывающие трудности, получают необходимую поддержку именно в тех разделах знаний, которые препятствуют их дальнейшему профессиональному росту [8]. Это дает возможность решить фундаментальную проблему инженерной школы – организовать высокую вариативность базовой подготовки абитуриентов с учетом их личностных способностей, обеспечивая на выходе гарантированный уровень зрелости каждого выпускника.

Цифровая трансформация предметного обучения: от автоматизации инструментов к изменению педагогических моделей

Современное управление предметным обучением в области ГПП требует выхода за рамки классической дидактики. Оно должно строиться на управлении сложными инженерными данными и использовании инструментов интеллектуального сопровождения. Если ранее фокус формирования предметных компетенций был направлен на освоение инструментария (первоначально – на умение пользоваться циркулем, позднее – на использование конкретной программой САПР), то перспективным приоритетом становится развитие пространственного интеллекта и способности управлять геометрической информацией в многомерных средах.

Под цифровой трансформацией ГПП теперь понимается не простое насыщение кафедр программным обеспечением (CAD/PLM-системами), а глубокая реорганизация дидактической системы. Фундаментальное различие заключается в переходе от автоматизации существующих методов к проектированию новых образовательных моделей [5, 8].

Ключевые характеристики такой трансформации обусловлены **отходом от «оцифрованного черчения»**. В отличие от этапа автоматизации, где компьютер использовался лишь как замена кульмана (электронный чертеж), трансформация не просто облегчает процесс «рутинного проектирования», а переносит центр тяжести на цифровое параметрическое моделирование [9]. Педагогическая модель меняется: целью становится не «чертеж детали», а создание «интеллектуальной геометрии модели», способной к автоматическим изменениям при варьировании параметров.

Одновременно происходит **переход к доказательной педагогике (Evidence-based Education)**, в рамках которой заменяется интуитивный подход управления обучением анализом цифрового следа [6]. Данная методология позволяет адаптировать образовательную траекторию в режиме реального времени под конкретного студента.

Трансформация **профессиональной роли преподавателя** проявляется как эволюция от транслятора знаний к роли архитектора образовательных траекторий, а соблюдение контроля нормативных требований и обеспечения базовой подготовки берут на себя интеллектуальные системы и ИИ-ассистенты [8, 9].

В контексте **конвергентного обучения** новая педагогическая модель поднимает геометро-графическую подготовку на уровень сквозного проектирования, являясь интегрированным модулем в создании комплексного цифрового двойника изделия [6].

Таким образом, цифровая трансформация геометро-графической подготовки предвещает переход к адаптивной педагогике, где технологические решения определяют не только способы представления графической информации, но и как выстраивается процесс мышления будущего инженера в многомерной цифровой экосистеме. Переход от «автоматизации рутины» к «трансформации сознания» становится главным вектором развития инженерной школы.

Роль ИИ-ассистентов в проектировании индивидуальных траекторий в рамках геометро-графических дисциплин

В настоящее время возможности искусственного интеллекта применительно к инженерному образованию позволяют перейти от генерации контента к динамическому проектированию образовательного опыта [8]. В рамках геометро-графической подготовки ИИ-ассистент может стать ключевым посредником между жесткими требованиями государственных стандартов и индивидуальными когнитивными особенностями студента, а для обеспечения актуальности инженерного образования программные агенты могут реализовать механизм «живой связи» между учебным процессом и реальным сектором экономики [10].

Можно выделить следующие функциональные направления работы ИИ-ассистентов:

- **Снятие «страха ошибки».** Ассистент берет на себя роль «безопасного критика», где позволяет студенту ошибаться в виртуальном пространстве и сразу показывает на несоответствие стандарту на ранних этапах.

- **Интеллектуальный аудит «геометрического мышления».** В CAD-системе ИИ-ассистенты анализируют не только корректность финальной 3D-модели, но и стратегию её создания. При фиксации нерациональных методов построения (например, избыточное количество эскизов вместо использования массивов или зеркального отражения) система предлагает модуль «Оптимизация параметрических связей».

- **Динамическое устранение «пробелов» в пререквизитных знаниях.** Пробелы в фундаменте знаний по начертательной геометрии приводят к проблемам в освоении компьютерного моделирования. В этом случае ИИ-ассистент идентифицирует эти пробелы в режиме реального времени. Например, студент затрудняется в построении линии пересечения сложных тел при моделировании в CAD-системе, ассистент предлагает интерактивный 3D-тренажер, помогая восстановить базовый навык без прерывания общего курса.

- **Переход к реверс-инжинирингу.** Анализируя рост вакансий в отраслях, занимающихся импортозамещением и модернизацией оборудования, ИИ-ассистент может предложить студенту модуль по обработке данных 3D-сканирования. Вместо построения модели «с нуля» по чертежу студент учится восстанавливать параметрическую геометрию по облаку точек, что является критически важным навыком для современного инженера-конструктора.

- **Визуализация и верификация в VR-средах.** Видя тренд на использование виртуальных прототипов в крупных корпорациях (авиация, судостроение), ИИ предлагает студенту освоить экспорт и аудит геометрических моделей в иммерсивных пространствах. Это включает обучение навыкам проверки собираемости сложных узлов «в полный рост» в VR-шлеме, что заменяет традиционную проверку чертежей на бумаге.

Для реализации роли ИИ-ассистентов применительно к геометро-графической подготовке следует акцентировать внимание на переходе от «пассивного справочника» к «активному интеллектуальному наставнику». Переход к управлению на основе данных в инженерном образовании решает главную проблему – разрыв между индивидуальным темпом усвоения пространственных концепций и жестким графиком учебного процесса [10–12]. ИИ-ассистенты обеспечивают непрерывную обратную связь, превращая изучение геометро-графических дисциплин из «черчения по образцу» в осознанное конструирование профессионального профиля.

Цифровые инструменты сопровождения образовательного процесса

На данном этапе обучение в инженерно-технических вузах переходит от организационного администрирования к интеллектуальному эдвайзингу, что ведет к созданию индивидуальной поддерживающей среды, в которой технологии берут на себя функции навигации и контроля, освобождая человеческий интеллект для решения сложных инженерных и педагогических задач [4].

Отметим отличительные черты интеллектуального эдвайзинга.

1. **Непрерывность образовательного цикла.** В отличие от дискретной системы «лекция – зачет», интеллектуальные системы эдвайзинга обеспечивают бесшовный переход между этапами обучения [13]. Если студент освоил сложную параметризацию, система эдвайзинга автоматически передает эти данные, например, в модуль «Детали машин», предлагая студенту задачи повышенной сложности. Образовательный цикл становится единым процессом накопления инженерных компетенций, а не набором разрозненных предметов.

2. Минимизация издержек. Под издержками понимаются непроизводительные затраты ресурсов (времени, энергии, когнитивных усилий) всех участников процесса, которые возникают в ходе взаимодействия, но не ведут напрямую к получению новых знаний или созданию инженерного продукта. Цифровой стек сопровождения обеспечивает непрерывность образовательного цикла и минимизирует издержки участников, устраняя временные потери на рутинные взаимодействия [14]:

- *для студента:* отпадает необходимость поиска методических указаний, актуальных ГОСТов или справок. Когнитивные помощники мгновенно предоставляют нужный контент в контексте текущей задачи;

- *для преподавателя:* автоматизация проверки базовых графических навыков и нормативного контроля (ЕСКД) позволяет сконцентрировать свое внимание не на «исправлении толщины линий», а на проектных решениях.

Цифровой стек в геометро-графической подготовке представляет собой многоуровневую иерархию технологий, она обеспечивает сквозное проектирование и управление обучением. Сравнительный анализ издержек в геометро-графической подготовке приведен в табл. 1.

Сравнительный анализ издержек в геометро-графической подготовке

Таблица 1

Table 1

Comparative cost analysis in geometric and graphical preparation

Направление деятельности	Проявление	
	Традиционно	Интеллектуальный эдвайзинг
Поиск и доступ к информации	Студент тратит до 30 % учебного времени на поиск актуальных ГОСТов, методических указаний или поиск ошибок в оформлении чертежа	Интеллектуальные чат-боты и контекстные справочники (встроенные в CAD) предоставляют нужную норму ЕСКД мгновенно в момент совершения действия. Это исключает «информационный шум» и простои
Контроль и верификация (нормоконтроль)	Преподаватель тратит часы на ручную проверку правильности оформления графической информации, что является чисто технической, рутинной работой	ИИ-ассистенты выполняют автоматический пре-аудит цифровой модели. На проверку педагогу поступает проект, уже очищенный от формальных ошибок, что позволяет ему сфокусироваться на концептуальной экспертизе (логике конструкции, прочности, технологичности)
Коммуникация и обратная связь	Ожидание студентом консультации или оценки работы («цикл обратной связи») может занимать до нескольких дней	«Живая связь» через облачные платформы и ITS (интеллектуальные тьюторские системы) обеспечивает обратную связь в режиме 24/7. Студент узнает об ошибке в сопряжении деталей в момент её совершения, а не на консультации или зачете
Координации в командном проектировании	Потери времени участниками проекта на синхронизацию версий чертежей, сборку узлов из разрозненных файлов и исправление конфликтов геометрии	Использование Cloud-Native CAD и бесшовного цифрового стека позволяет вести параллельное проектирование в едином пространстве данных. Транзакционные издержки на «сшивку» проекта сводятся к нулю
Административные издержки	Сбор бумажных портфолио, ведение журналов, фиксация достижений	Автоматический сбор цифрового следа формирует объективный рейтинг компетенций студента без участия человека

В результате издержки минимизируются, что позволяет перераспределить высвободившиеся ресурсы (до 40–50 % общего времени дисциплины) на творческую проектную деятельность и решение сложных инженерных задач [13]. Таким образом, образовательный процесс из бюрократического

тического регламента преобразуется в высокоэффективный «интеллектуальный конвейер». Этот тезис фиксирует качественный переход в управлении образованием.

Функционал конкретных механизмов, которые превращают «интеллектуальный эдвайзинг» в фундамент подготовки современного инженера, приведен в табл. 2.

Функционал цифровых инструментов сопровождения обучения

Таблица 2

Table 2

The functionality of digital learning support tools

Тип	Функционал	Механизм	Результат
Предиктивные навигаторы образовательных траекторий	Системы на основе анализа «цифрового следа» студента в CAD-средах для прогнозирования успешности освоения профессиональных модулей	Если система фиксирует высокий уровень развития пространственного интеллекта (скорость манипуляций в 3D, точность сборок), она предлагает студенту переход к факультативам по высокотехнологичному проектированию (например, «Авиационное моделирование» или «Аддитивные технологии») [14]	Реализация принципа опережающего обучения для талантливых студентов
Когнитивные помощники реального времени (Contextual AI-Advisors)	Интеллектуальные надстройки, встроенные в интерфейс инженерного ПО (AutoCAD, SolidWorks, КОМПАС-3D и др.)	В процессе моделирования ИИ-эдвайзер анализирует «дерево построения» объекта. При обнаружении нерациональных решений (избыточность операций, нарушение логики сопряжений) система выдает контекстную подсказку: обучающее видео или ссылку на соответствующий раздел ГОСТ/ЕСКД [15]	Мгновенная обратная связь, минимизирующая накопление технических ошибок
Автоматизированные системы верификации компетенций (Skill-Verification Engines)	Инструменты, заменяющие традиционные формы контроля (экзамены) непрерывным мониторингом достижений	Система агрегирует данные о выполнении всех проектных заданий в единый блокчейн-профиль. Статус «компетенция сформирована» присваивается автоматически, если студент стабильно демонстрирует качество моделирования выше установленного порога в течение всего цикла обучения [13, 16]	Объективная оценка навыков, исключая субъективизм и стресс экзаменационных сессий
Системы адаптивного микрообучения (Micro-Learning Agents)	Инструменты, устраняющие «зоны риска» в знаниях студента без прерывания основного проектного процесса	Если предиктивная аналитика выявляет системную ошибку (например, неумение строить линии пересечения сложных поверхностей), эдвайзер генерирует индивидуальный микрокурс – серию интерактивных 3D-тренажеров, направленных на отработку именно этого узкого навыка [3, 17]	Гибкое устранение пробелов в пререквизитах в режиме «точно вовремя» (just-in-time learning)

Окончание табл. 2
Table 2 (end)

Тип	Функционал	Механизм	Результат
Интеллектуальные интерфейсы «Вуз – Индустрия»	Программные агенты, сопоставляющие текущие учебные проекты студента с актуальными технологическими требованиями компаний-партнеров	Эдвайзер анализирует выполненные чертежи и модели на предмет соответствия стандартам конкретных производств (например, технологические допуски для 3D-печати металлом). При достижении профессионального уровня система рекомендует студента для участия в реальных R&D-проектах (Research and Development – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы) предприятия [18–20]	Сокращение адаптационного периода выпускника на производстве

Использование данных инструментов превращает сопровождение обучения из административной функции в высокотехнологичный сервис поддержки принятия решений. Интеллектуальный эдвайзинг обеспечивает «бесшовность» образовательного процесса, где каждый шаг студента обоснован аналитикой и направлен на достижение максимальной конкурентоспособности на рынке труда.

На рисунке представлена общая схема адаптивного сопровождения образовательной деятельности. Интеллектуальная система в реальном времени подбирает сложность, предлагает модули для устранения пробелов, предсказывает трудности и рекомендует развитие, превращая обучение в гибкую, персонализированную траекторию предметного обучения.

Структурная схема адаптивного модульного обучения
Adaptive Modular Learning Framework

Адаптивная обучающая система представляет собой комплекс взаимосвязанных модулей, обеспечивающих персонализированный подход к обучению. Основой системы является модуль механизма адаптации, который анализирует данные о студенте и выстраивает индивидуальную траекторию освоения материала. Роль наставника для взаимодействия студента с курсом выпол-

няет блок администрирования. Профиль учащегося, хранящегося в специальном модуле, определяет способы обучения и формирует индивидуальную траекторию освоения предметной области. Сводная информация оценивания студенческих достижений позволяет принимать решения о необходимости совершенствования курса обучения.

Заключение

Проведенное исследование обосновывает неизбежность и стратегическую значимость перехода инженерного образования к новой цифровой парадигме. Трансформация предметного обучения, в частности геометро-графической подготовки, демонстрирует смену вектора: от автоматизации рутинных процессов черчения к фундаментальному изменению образовательных моделей и методов управления процессом предметного обучения [5].

В связи с неэффективностью классической модели инженерного образования в условиях Индустрии 5.0 рассмотрена новая цифровая парадигма управления предметным обучением, в которой целью ГПП становится создание адаптивной экосистемы, где под сопровождением искусственного интеллекта для каждого студента организован индивидуально настроенный процесс формирования инженерных компетенций, обеспечивающих подготовку специалиста для успешного функционирования в условиях высокотехнологичного производства и опережающего развития индустрии. Модель адаптивного управления на основе данных (Data-Driven Management) заменяет линейное планирование гибкими, индивидуализированными траекториями, базирующимися на анализе «цифрового следа» студента.

Определена ключевая функция ИИ-ассистентов как посредников между жесткими требованиями предметных нормативов и индивидуальными когнитивными особенностями обучающихся, а также как механизма «живой связи» образования с актуальными потребностями рынка труда.

Обоснован переход от организационного администрирования к интеллектуальному эдвайзингу, обеспечивающему непрерывность образовательного цикла и минимизацию непроизводительных издержек за счет использования когнитивных помощников и систем предиктивной аналитики.

Дальнейшее развитие темы требует экспериментальной проверки эффективности предложенной модели управления:

- 1) верификация метрик «цифрового следа»;
- 2) сравнение контрольных групп (традиционное линейное планирование) и экспериментальных групп (адаптивное управление с ИИ-эдвайзингом);
- 3) разработка методик оценки влияния иммерсивных технологий (VR/AR) на формирование пространственного мышления инженеров;
- 4) развитие механизмов «живой связи» с индустрией.

Предполагается, что результаты экспериментальной апробации позволят верифицировать предложенную модель управления и сформировать окончательный регламент её внедрения в практику инженерного образования [20].

В целом цифровая трансформация предметного обучения – это не просто тренд, а стратегический императив, направленный на подготовку инженерной элиты, способной решать комплексные задачи глобального технологического развития.

Список литературы

1. Корчак К.И., Красильников В.В., Тоискин В.С. Современные подходы к понятию цифровой трансформации образования // Проблемы современного образования. 2022. № 1. С. 171–183. DOI: 10.31862/2218-8711-2022-1-171-183
2. Голованова Н.И., Смирнова Е.А. Трансформация учебного процесса: управление интеграцией цифровых технологий и современных образовательных стратегий // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Государственное и муниципальное управление. 2025. Т. 12. № 1. С. 115–125. DOI: 10.22363/2312-8313-2025-12-1-115-125
3. Игнатенко Н.А., Морозов С.А. Предиктивная аналитика и скоринг студентов с помощью нейронных сетей // Вестник науки. 2025. Т. 2, № 11 (92). С. 796–803.
4. Сундукова Т.О., Ваныкина Г.В. Коучинг, менторинг и эдвайзинг: традиции и инновации // Электрон. науч.-практ. журн. «Современная педагогика». 2016. № 11 (48). С. 34–39. URL: <https://pedagogika.snauka.ru/2016/11/6217>.

5. Столбова И.Д., Кочурова Л.В., Носов К.Г. К вопросу о цифровой трансформации предметного обучения // Информатика и образование. 2020. № 9 (318). С. 53–63. DOI: 10.32517/0234-0453-2020-35-9-53-63
6. Kukushkin K., Ryabov Y., Borovkov A. Digital Twins: A Systematic Literature Review Based on Data Analysis and Topic Modeling // Data. 2022. Vol. 7, no. 12. P. 173. DOI: 10.3390/data7120173
7. Токтарова В.И., Пашкова Ю.А. Предиктивная аналитика в цифровом образовании: анализ и оценка успешности обучения студентов // Сибирский педагогический журнал. 2022. № 1. С. 97–106. DOI: 10.15293/1813-4718.2201.09
8. Адаптивные интеллектуальные системы поддержки обучения в высшей школе: подходы, технологии, эффекты / Е.Ю. Голованова, К.Н. Моругова, М.И. Сорокина и др. // Управление образованием: теория и практика. 2024. № 10-1. С. 91–99. DOI: 10.25726/a6526-9930-0748-x
9. Генеративный искусственный интеллект в высшем образовании: обзор теоретических подходов и практик применения / Е.А. Кошкина, Н.В. Бордовская, Д.С. Гнедых и др. // Высшее образование в России. 2025. Т. 34, № 6. С. 36–57. DOI: 10.31992/0869-3617-2025-34-6-36-57
10. Столбова И.Д., Александрова Е.П., Крайнова М.Н. Модульная технология управления предметной подготовкой студентов // Университетское управление: практика и анализ. 2012. № 5 (81). С. 88–95.
11. Павлов А.Ф., Мякишева Ю.В., Родионова Г.Н. Опыт применения технологии адаптивного обучения в образовательном процессе высшего учебного заведения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки. 2024. Т. 26, № 3 (96). С. 70–76. DOI: 10.37313/2413-9645-2024-26-96-70-76
12. Конструирование методов активизации учебной деятельности учащихся при изучении математики с помощью нейросетевых инструментов / Б.Е. Стариченко, П.Г. Безбородова, Е.А. Софрыгина, Г.М. Шоева // Педагогическое образование в России. 2025. № 2. С. 43–55.
13. Галагузова М.А., Перекальский И.Н. Трансформация образования с внедрением искусственного интеллекта: постановка проблемы // Ценности и смыслы. 2024. № 1 (89). С. 84–94. DOI: 10.24412/2071-6427-2024-1-84-94
14. Нигодин Е.А. Исследование эффективности применения модели цифрового ассистента преподавателя при профессиональной подготовке бакалавров математических направлений // Науч.-метод. электрон. журн. «Концепт». 2025. № 08. С. 382–402. URL: <https://e-koncept.ru/2025/251170.htm>. DOI: 10.24412/2304-120X-2025-11170
15. Chikurtev D., Chikurteva A., Gyoshev S. 3D technologies for digitalization and creation of new educational resources in engineering // INTED2023 Proceedings. 2023. P. 7073–7081. DOI: 10.21125/inted.2023.1932
16. Лапыгин Ю.Н., Лапыгин Д.Ю. Использование искусственного интеллекта в качестве виртуального участника учебной группы в процессе обучения принятию решений // Профессиональное образование и рынок труда. 2025. Т. 13, № 4 (63). С. 202–213. DOI: 10.52944/PORT.2025.63.4.012
17. Садыкова А.Р., Левченко И.В. Искусственный интеллект как компонент инновационного содержания общего образования: анализ мирового опыта и отечественные перспективы // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. 2020. Т. 17, № 3. С. 201–209. DOI: 10.22363/2312-8631-2020-17-3-201-209
18. Hoefele J. European Digital Competence Frameworks and Engineering Pedagogy // Mobility for Smart Cities and Regional Development – Challenges for Higher Education. ICL 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 390. Springer, Cham, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-93907-6_87
19. Назарова Ж.А. Геометро-графическая подготовка студентов технических специальностей в современных условиях // Геометрия и графика. 2024. Т. 12, № 1. С. 41–49. DOI: 10.12737/2308-4898-2024-12-1-41-49
20. Пестов В.В., Москвин Д.А. ИИ-тьютор для персонализированного обучения в современной школе // Цифровая гуманитаристика и технологии в образовании (DHTE 2025): сб. ст. VI Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 13–14 ноября 2025 года. М.: Моск. гос. психол.-пед. ун-т, 2025. С. 230–251.

References

1. Korchak K.I., Krasilnikov V.V., Toiskin V.S. Modern approaches to the concept of digital transformation of education. *Problemy sovremennogo obrazovaniya*. 2022;(1):171–183. (In Russ.) DOI: 10.31862/2218-8711-2022-1-171-183
2. Golovanova N.I., Smirnova E.A. Transformation of the educational process: Managing the integration of digital technologies and modern educational strategies. *RUDN Journal of Public Administration*. 2025;12(1):115–125. (In Russ.) DOI: 10.22363/2312-8313-2025-12-1-115-125
3. Ignatenko N.A., Morozov S.A. Predictive analytics and student scoring using neural networks. *Science Bulletin*. 2025;2(11(92));796–803. (In Russ.)
4. Sundukova T.O., Vanykina G.V. Coaching, mentoring and advising: Tradition and innovation. *Electronic scientific & practical journal "Modern pedagogy"*. 2016; 11 (48). (In Russ.) Available at: <https://pedagogika.snauka.ru/en/2016/11/6217>.
5. Stolbova I.D., Kochurova L.V., Nosov K.G. [About digital transformation of subject learning]. *Informatics and Education*. 2020;9(318):53–63. (In Russ.) DOI: 10.32517/0234-0453-2020-35-9-53-63
6. Kukushkin K., Ryabov Y., Borovkov A. Digital Twins: A Systematic Literature Review Based on Data Analysis and Topic Modeling. *Data*. 2022;7(12):173. DOI: 10.3390/data7120173
7. Toktarova V.I., Pashkova Yu.A. Predictive analytics in digital education: Analysis and evaluation of students' learning success. *Siberian Pedagogical Journal*. 2022;(1):97–106. (In Russ.) DOI: 10.15293/1813-4718.2201.09
8. Golovanova E.Y., Morugova K.N., Sorokina M.I., Mayorova O.A., Minnigaleeva A.A. Adaptive intelligent learning support systems in higher education: approaches, technologies, effects. *Education Management Review*. 2024;14(10-1):91–99. (In Russ.) DOI: 10.25726/a6526-9930-0748-x
9. Koshkina E.A., Bordovskaya N.V., Gnedykh D.S., Khromova M.A., Demyanchuk R.V., Iskhakova M.P., Balyshev P.A. Generative Artificial Intelligence in Higher Education: A Review of Theoretical Approaches and Application Practices. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia*. 2025;34(6):36–57. (In Russ.) DOI: 10.31992/0869-3617-2025-34-6-36-57
10. Stolbova I.D., Alexandrova E.P., Krainova M.N. Module technology of management by subject preparation of students. *University Management: Practice and Analysis*. 2012;5(81):88–95. (In Russ.)
11. Pavlov A.F., Myakishcheva Yu.V., Rodionova G.N. The use of adaptive learning technology in the educational process of higher education institutions. *Izvestiya of the Samara Science Centre of the Russian Academy of Sciences. Social, Humanitarian, Biomedical Sciences*. 2024;26(3(96)):70–76. (In Russ.) DOI: 10.37313/2413-9645-2024-26-96-70-76
12. Starichenko, B. E., Bezborodova, P. G., Sofrygina, E. A., Shoeva, G. M. Designing Methods for Enhancing Students' Learning Activities in Mathematics Through the Use of Neural Network Tools. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia*. 2025;(2):43–55. (In Russ.)
13. Galaguzova M.A., Perekalsky I.N. Transformation of education with the introduction of artificial intelligence: problem statement. *Values and Meanings*. 2024;1(89):84–94. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6427-2024-1-84-94
14. Nigodin E.A. A study of the effectiveness of using the digital teaching assistant model in the professional training of undergraduates in mathematical fields. *Scientific-methodological electronic journal "Koncept"*. 2025;(08):382–402. (In Russ.) Available at: <https://e-koncept.ru/2025/251170.htm>. DOI: 10.24412/2304-120X2025-11170
15. Chikurtev D., Chikurteva A., Gyoshev S. 3D technologies for digitalization and creation of new educational resources in engineering. In: *INTED2023 Proceedings*. 2023. P. 7073–7081. DOI: 10.21125/inted.2023.1932
16. Lapygin Yu.N., Lapygin D.Yu. Using artificial intelligence as a virtual participant in a study group for teaching decision-making. *Vocational Education and Labour Market*. 2025;13(4(63)):202–213. (In Russ.) DOI: 10.52944/PORT.2025.63.4.012
17. Sadykova A.R., Levchenko I.V. Artificial intelligence as a component of innovative content of general education: analysis of world experience and domestic prospects. *RUDN Journal of Informatization in Education*. 2020;17(3):201–209. (In Russ.) DOI: 10.22363/2312-8631-2020-17-3-201-209
18. Hoefele J. European Digital Competence Frameworks and Engineering Pedagogy. In: *Mobility for Smart Cities and Regional Development – Challenges for Higher Education. ICL 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 390. Springer, Cham, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-93907-6_87

19. Nazarova Z.A. Geometric and Graphic Training of Technical Students in Modern Conditions. *Geometry & Graphics*. 2024;12(1):41–49. (In Russ.) DOI: 10.12737/2308-4898-2024-12-1-41-49

20. Pestov V.V., Moskvina D.A. AI tutor for personalized learning in modern school. *Digital Humanities and Technologies in Education (DHTE 2025)*. Moscow, 2025. P. 230–251. (In Russ.)

Информация об авторах

Тарасова Любовь Сергеевна, аспирант, старший преподаватель кафедры дизайна, графики и начертательной геометрии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; liebe_perm@mail.ru.

Столбова Ирина Дмитриевна, д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой дизайна, графики и начертательной геометрии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; stolbova.irina@gmail.com.

Information about the authors

Lyubov S. Tarasova, Postgraduate Student, Senior Lecturer at the Department of Design, Graphics and Descriptive Geometry, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; liebe_perm@mail.ru.

Irina D. Stolbova, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Design, Graphics and Descriptive Geometry, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; stolbova.irina@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 27.12.2025

The article was submitted 27.12.2025

ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА И СОГЛАСОВАНИЯ ЗНАНИЙ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ

С.А. Баркалов, bsa610@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

А.В. Белоусов, alexbelousov19@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0934-6724>

О.Н. Бекирова, obekirova@cchgeu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6373-3452>

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В данной работе рассматриваются вопросы синтеза, согласования и извлечения знаний в комбинированных и сетевых экспертных системах. В настоящее время для принятия ответственных решений применяются комплексные подходы, объединяющие неформальные знания экспертов, формальные логические конструкции и математические алгоритмы. Однако для разрешения сложных задач, затрагивающих экономику, технику или социальные сферы, часто необходимы знания и опыт целой группы специалистов, обладающих компетенциями в разных областях. Для эффективного функционирования консилиумов и координационных советов, принимающих групповые решения, необходимы совершенствование существующих процедур и, что особенно важно, научная и техническая база для обогащения и синтеза знаний. **Цель исследования** заключается в разработке моделей и алгоритмов синтеза, пополнения и извлечения знаний в комбинированных и сетевых экспертных системах, позволяющих существенно минимизировать риски извлечения некорректных знаний путем модификации функции вывода. **Материалы и методы исследования.** Функции, реализующие строгое наследование, находят свое воплощение в механизме скалярной оптимизации, направленном на достижение конкретной цели. В свою очередь, функции, обладающие свойствами наследования и согласия, могут быть эффективно реализованы с помощью механизма векторной оптимизации, основанного на принципах предпочтения. Паретова оптимизация обеспечивает реализацию функций выбора, которые обладают такими важными качествами, как наследование, согласованность и независимость от отброшенных вариантов. **Результаты.** Представленные в статье методы предоставляют эффективный инструмент для оперативного разрешения широкого спектра задач, неизбежно возникающих при синтезе сложных и дорогостоящих экспертных систем и их ядра – баз знаний, учитывая как внутренние, так и внешние факторы неопределенности. Благодаря использованию Паретовой оптимизации при пополнении знаний в ядро системы создается основа для системы поддержки принятия решений для руководителей различных уровней иерархии, при этом функция вывода всегда соответствует конкретному ЛПР. **Заключение.** Полученные результаты в полной мере применимы для создания систем синтеза знаний, представляющих собой сети согласованных экспертных систем. Такие системы смогут не только имитировать решения конкретных специалистов, но и воспроизводить коллективные решения экспертов, обладающих разным опытом в разных сферах сложных проблем.

Ключевые слова: алгоритм; векторная оптимизация; лицо, принимающее решения; граф; экспертная система; функция вывода

Для цитирования: Баркалов С.А., Белоусов А.В., Бекирова О.Н. Задачи и алгоритмы синтеза и согласования знаний для комбинированных экспертных систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 3. С. 68–78. DOI: 10.14529/ctcr260306

PROBLEMS AND SYNTHESIS ALGORITHMS AND APPROVALS OF KNOWLEDGE FOR THE COMBINED EXPERT SYSTEMS

S.A. Barkalov, bsa610@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

A.V. Belousov, alexbelousov19@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0934-6724>

O.N. Bekirova, obekirova@cchgeu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6373-3452>

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. In this work questions of synthesis, approval and extraction of knowledge in the combined and network expert systems are considered. Now the integrated approaches integrating informal knowledge of experts, formal logical constructions and mathematical algorithms are applied to acceptance of crucial decisions. However, knowledge and experience of the whole group of the specialists having competences of different areas are often necessary for permission of the difficult tasks mentioning economy, the equipment or social spheres. For effective functioning of the consultations and coordination councils making group decisions are necessary improvement of the existing procedures and that is especially important, scientific and technical base for enrichment and synthesis of knowledge. **The research objective** consists in development of models and synthesis algorithms, replenishments and extraction of knowledge in the combined and network expert systems allowing to minimize significantly risks of extraction of incorrect knowledge by modification of output function. **Materials and methods of a research.** The functions implementing strict inheritance find the embodiment in the mechanism of scalar optimization directed to achievement of a specific goal. In turn, the functions having properties of inheritance and consent can be effectively implemented by means of the mechanism of vector optimization based on the principles of preference. Pareto optimization provides implementation of functions of the choice which have such important qualities as inheritance, coherence and independence of the discarded options. **Results.** The methods presented in article provide the effective tool for operational permission of a broad spectrum of the tasks which are inevitably arising at synthesis of complex and expensive expert systems and their kernels – knowledge bases, considering, both internal, and external factors of uncertainty. Thanks to Pareto optimization at replenishment of knowledge in a system kernel, the basis for decision making support system for heads of different hierarchy levels is created, at the same time output function always corresponds to the specific decision-maker. **Conclusion.** The received results are fully applicable for creation of systems of synthesis of knowledge representing networks of the coordinated expert systems. Such systems will be able not only to imitate solutions of specific specialists, but also to reproduce collective solutions of the experts having different experience in different spheres of complex problems.

Keywords: algorithm; vector optimization; person making decisions; graph; expert system; output function

For citation: Barkalov S.A., Belousov A.V., Bekirova O.N. Problems and synthesis algorithms and approvals of knowledge for the combined expert systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(3):68–78. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260306

Введение

В качестве основы для создания базы знаний, ориентированной на решение конкретной задачи, используются протоколы диалогов между инженером, специализирующимся на машинном обучении, и экспертом в данной области. Полученная база содержит лишь ограниченный набор «знаний».

Функция выбора (ФВ), предназначенная для работы с этой базой, обучена на ограниченном количестве примеров. Для обеспечения удовлетворительного ответа на запросы пользователя необходимо установить строгие критерии для отбора начальных предъявлений и их количества. Для того чтобы база знаний эффективно пополнялась с обоснованием, необходимо, чтобы у инженера по машинному обучению имелись достаточные данные для выявления мотивационных факторов, определяющих выбор эксперта [1].

Формула функции вывода (ФВ) может быть рассчитана для любого пользователя и любого варианта из набора предложений, относящихся к исследуемой тематике, благодаря алгоритму, имитирующему подход эксперта к выбору. Свойства, которые приобретает ФВ, устанавливаются механизмом выбора, задействованным в алгоритме. Функции, реализующие строгое наследование, находят свое воплощение в механизме скалярной оптимизации, направленном на достижение конкретной цели [2]. В свою очередь, функции, обладающие свойствами наследования и согласия, могут быть эффективно реализованы с помощью механизма векторной оптимизации, основанного на принципах предпочтения.

Паретова оптимизация обеспечивает реализацию функций выбора, которые обладают такими важными качествами, как наследование, согласованность и независимость от отброшенных вариантов. Для классов ФВ, обладающих другими, не противоречащими друг другу, свойствами, применяются схемы динамического программирования, основанные на определенной информационной структуре [3].

Этот подход подразумевает создание экономной программы извлечения знаний: сбор только необходимой информации, которая позволит построить алгоритмы логического вывода и тем самым расширить базу знаний.

Постановка задачи

Вопрос о расширении базы знаний сводится к следующему [3, 4]:

Пусть задано поле выбора $B(G)$, тогда:

1) определить минимальное количество предъявлений, необходимое для получения непустых значений функциональной зависимости (ФВ) $C(\cdot)$, обладающих заданными свойствами – характеристиками мотивации экспертного решения. Это позволит обеспечить наполнение ФВ, отражающее определенное ее сечение (т. е. $ФВ \hat{C}(X) \subseteq C(X) \forall X \in B(G)$) в рамках всего поля выбора;

2) разработать алгоритм, который будет наполнять фрагмент функциональной модели, ориентируясь на выявленные причины экспертного решения.

Рассмотрим ряд утверждений, которые помогают понять, насколько сложно пополнять знания в сложных областях, отвечающих ключевым требованиям, связанным с мотивацией экспертных решений. Эти же утверждения можно интерпретировать как необходимые условия для накопления знаний и применить для создания соответствующих вычислительных алгоритмов:

При соблюдении условия наследования для непустой ФВ $\{C(\cdot), B(G)\}$ и регулярном предъявлении G возможно восстановить сечение $\hat{C}(\cdot)$ ФВ $\{C(\cdot), B(G)\}$, которое будет строго наследовать заданные свойства по $\chi_C(G)$.

В случае, когда функциональная величина (ФВ) $\{C(\cdot), B(G)\}$ наследует свойства и все максимальные предъявления регулярны, ее сечение, также наследующее эти свойства [5], может быть определено на основе характеристик этих предъявлений ФВ $\{C(\cdot), B(G)\}$.

Рассмотрим молекулу M_z , состоящую из атомов, чьи области влияния частично перекрываются Z .

В данном случае получается, что если функция ФВ $\{C(\cdot), B(G)\}$, описывающая синтез координатных

$$ФВ \{C_i(\cdot), B_i(G_i)\}, i \in I, C(\cdot), \quad (1)$$

наследуется на молекулах и

$$\forall Z \in B(G) \ C(Z) \supseteq Z \cap C(M_z), \quad (2)$$

то для определения сечения $C(\cdot)$ восстановления понадобится информация только о молекулах с максимальным уровнем включения.

Расширенная задача пополнения знаний

Пусть выполнены условия [6]:

1) $V(\cdot)$ отображает значения в однообразном порядке, где

$$\forall A, B \in K(H): V(A) \cap V(B) \neq \emptyset \Rightarrow A \cap B \neq \emptyset; \quad (3)$$

2) $K(H)$ охватывает все множества H , состоящие из одного элемента, и сохраняет свойство замкнутости при пересечении;

3) $(\cdot): B(G) \rightarrow B_M(G)$ также соответствует требованиям наследования;

4) $\forall X, Y \in B_M(G) X \cap Y \neq \emptyset \rightarrow X \cap Y \in B_M(G)$;

5) $V(H)$ – систематическое представление в $B(G)$.

Для создания сечения расширенной функции вывода (РФВ)

$$[V(\cdot), K(H), C(\cdot), B(G)] \quad (4)$$

необходимо лишь знать величины $C(\cdot), V(\cdot), W(\cdot), \lambda^*(\cdot)$ на $O(n + m)$ в заданных наборах при условии, что $m = |H|, n = |G|$.

Тогда для получения сечения РФВ рекомендуется придерживаться описанной ниже процедуры.

Алгоритм 1

Шаг 1. В самом начале производится расчет показателя $\chi_c(V(H))$.

Шаг 2. На основе свойств $\chi_c(V(H))$ создается группа или семейство $P_V(H)$.

Шаг 3. Определяются значения $V(\cdot)$ в точках множества H .

Шаг 4. На четвертом этапе на входе $A \in K(H)$ выявляется элемент k , имеющий наименьший номер среди тех $P_V(H)$, у которых пересечение с заданной областью не пусто.

В данном случае значение сечения ФВ вычисляется по следующей формуле:

$$F(A) = V^1(A \cap \lambda^*(W(C(C_\Delta^k(V(H)))))). \quad (5)$$

Если реализованы следующие условия [7]:

1) $C(\cdot): B^1(G) \rightarrow B_M(G)$ – соответствует критериям наследования;

2) $\forall A, B \in K(H) V(A) \subseteq V(B) \Leftrightarrow A \subseteq B$;

3) $V(A)$ – постоянное выставление на проверку в любых максимально обширных сценариях $A \in K(H)$;

4) $K(H)$ включает в себя любой набор, состоящий из одного элемента.

Изучая одноэлементные ситуации $V(\cdot)$, свойства образов, максимально охватывающих элементы $K(H)$ при визуализации $V(\cdot)$, а также значения $W(\cdot)$ и $\lambda^*(\cdot)$, присвоенные этим образам, можно получить информацию о сечении РФВ $[V(\cdot), K(H), C(\cdot), B(G)]$.

В качестве методики создания сечения РФВ рекомендуется алгоритм 2.

Алгоритм 2

Шаг 1. В множестве $V(\cdot)$ устанавливаются значения для каждой точки.

Шаг 2. Определяется полный список самых обширных элементов $K(H)$, включая все возможные значения $V(\cdot)$ для каждого элемента $[V(A_i), i \in I]$, представленные в виде списка $[\chi_c(V(A_i), i \in I)]$, а также сопутствующий набор их свойств.

Шаг 3. Определяются величины $W(\cdot)$ и $\lambda^*(\cdot)$, соответствующие элементам характеристик.

Шаг 4. В качестве следующего шага выявляется полный набор ситуаций $A \in K(H)$, которые максимально охватывают входную ситуацию $I(A)$, и затем вычисляется значение $V^1(A)$ путем объединения значений $V(\cdot)$, присущих каждой из этих ситуаций.

Шаг 5. Рассмотрим минимальный элемент множества $I(A)$ (для наглядности). Его вычисление $\text{rg}(V(A)/V(A_i))$ (для упрощения рассуждений) даст нам пересечение с элементом $V^1(A)$ – характеристики $\chi^*(V(A_i))$, которое, в свою очередь, совпадет с сечением [8] исходной функциональной зависимости.

Очевидно, трудозатраты данной процедуры тесно связаны с количеством t максимально включенных элементов $K(H)$, которое в разы больше, чем в процедуре 1. Таким образом, количество множеств $V(\cdot), C(\cdot), W(\cdot), \lambda^*(\cdot)$, где производятся вычисления значений, идентично $t \times O(n + m)$.

Прямая задача синтеза знаний (ПЗСЗ)

Проблема синтеза знаний заключается в следующем.

Представлены непустые координатные функции $\{C_i(\cdot), B_i(G_i)\}_{i=1}^k$ и алгоритм сопоставления $[D(\cdot), ML(G)]$.

Необходимо выявить синтетическую функцию связи (ФВ) $\{C(\cdot), B(G)\}$, где $G = \prod_{i \in I} G_i, C(\cdot)$, которая соответствует согласованным координатным ФВ $G_i(\cdot), I = \{1, 2, \dots, k\}$.

Для более точного определения задачи необходимо ввести ряд уточняющих определений.

Для каждой функциональной величины (ФВ) $\{C_i(\cdot), B_i(G_i)\}$, определенной на частных множествах G , мы сопоставим ее дополнение $\{C^1(\cdot), B^1(G)\}$, также заданное на частных множествах $\prod_{i \in I} G_i$:

$$B_i^1(G) = \{Z: Z = \prod_{m \in I} X_m, X_i \in B_i(G_i), X_m \subseteq G_m, m \neq i\}; \quad (6)$$

$$C_i^1(\prod_{m \in I} X_m) = \prod_{m \in I} Y_m, Y_i = C_i(X_i), Y_m = X_m, m \neq i. \quad (7)$$

Пусть

$$\bigcap_{i \in I} B_i^1(G) = \left\{ Z: Z = \bigcap_{i \in I} X_i, X_i \in B_i^1(G) \right\}. \quad (8)$$

Рассмотрим естественный вариант продолжения $\bigcap_{i \in I} B_i^1(G)$ (Картезианское произведение множеств выборов ФВ $\{C_i(\cdot), B_i(G_i)\}_{i=1}^k$) на основе $\prod(\{B_i(G_i)\}_1^k)$.

Пусть

$$C_v(\prod_{i \in I} X_i) = \prod_{i \in I} C_i(X_i) \quad \forall X_i \in B_i(G_i), \quad (9)$$

тогда

$$\{C_i(\cdot), B_i(G_i)\}_{i=1}^k \text{ ФВ } \left\{ C_v(\cdot), \bigcap_{i \in I} B_i^1(G_i) \right\} \quad (10)$$

представляет собой ядро набора.

Поведение ядра аналогично [8, 9] поведению каждой координатной функции, но только в рамках определенных множеств:

$$\bigcap_{i \in I} B_i^1(G_i).$$

Синтетическая функция выборки (ФВ) предъявляет повышенные требования к области определения, которая, в отличие от ядра, не ограничивается параллелепипедами [9].

Тогда ФВ $\{C(\cdot), B(G)\}$ является синтезом набора $\{C_i(\cdot), B_i(G_i)\}_{i=1}^k$, если выполнены следующие требования:

$$\left\{ \begin{array}{l} G = \prod_{i \in I} G_i; \\ \bigcap_{i \in I} B_i^1(G_i) \subseteq B_M(G) \subseteq \prod(\{B_i(G_i)\}_1^k); \\ C(Z) \cap C_v(Z) \neq \emptyset \quad \forall Z \in \bigcap_{i \in I} B_i^1(G_i); \\ D(X) \subseteq \bigcup_{Y \in X_M} \bigcup_{i \in I} C_i^1(Y) \quad \forall X \in ML(G); \\ D(C_v(X)) \cap C(X) \neq \emptyset \quad \forall X \in ML(G). \end{array} \right. \quad (11)$$

Рассмотрим естественные предпосылки согласования, присущие задачам многомерного синтеза.

Предположим, что каждый элемент множества ФВ имеет базис $\{C_i(\cdot), B_i(G_i)\}_{i=1}^k$, $\forall i \in \overline{1, k} \exists N_i(G_i) \subseteq B_i(G_i)$, что удовлетворяет условиям:

- 1) $\forall Z \in B_i(G_i)$ его поверхность охватывают элементы из $N_i(G_i)$,
- 2) $\forall Z \in N_i(G_i) C_i(Z) = Z$.

Создадим множество

$$M(\prod_{i \in I} G_i) = \{Z: Z = \prod_{i \in I} X_i, X_i \in N_i\}. \quad (12)$$

Атомы, входящие в это множество, формируют структуру атомной решетки по отношению к ФВ $\left\{ C_v(\cdot), \bigcap_{i \in I} B_i^1(G_i) \right\}$.

Пусть будет обозначено множеством всех молекул $ML(\prod_{i \in I} G_i)$, а его естественным расширением $ML(\prod_{i \in I} G_i)$ – через $\widehat{ML}(\prod_{i \in I} G_i)$.

Рассмотрим две молекулы [10]: одна состоит из атомов, частично или полностью перекрывающихся $Z \in B(G)$ с M_Z , а другая – из атомов, являющихся элементами N_Z .

В рамках нашего анализа мы будем исследовать контролируемый синтез, где параметры согласования подчиняются заданным соотношениям [10]:

- 1) $ML(\prod_{i \in I} G_i) \subseteq B(G) \subseteq \widehat{ML}(\prod_{i \in I} G_i)$;
- 2) $\forall Z \in B(G) M_Z, N_Z \in B(G)$;
- 3) Если Z – молекула, то и $C(Z)$ – молекула.

Расширенная прямая задача синтеза знаний (РПЗСЗ)

В рамках расширенной прямой задачи мера синтеза знаний заключается в установлении связей между данными, представленными в виде координатных [11] РФВ:

$$[V_i(\cdot), K_i(H_i), C_i(\cdot), B_i(G_i)], i \in I = \{1, 2, \dots, k\}, \quad (13)$$

следующей РФВ $[V(\cdot), K(H), C(\cdot), B(G)]$ при нижеприведенных ограничениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} G = \prod_{i \in I} G_i, H = \prod_{i \in I} H_i; \\ \{Z: Z = \prod_{i \in I} Z_i, Z_i \in K_i(H_i), i \in I\} \subseteq K(H); \\ \{X: X = \prod_{i \in I} X_i, X_i \in B_i(G_i), i \in I\} \subseteq B(G); \\ \forall X = \prod_{i \in I} X_i \in B(G) \ C(X) \cap \prod_{i \in I} C_i(X_i) \neq \emptyset; \\ D(X) \subseteq \bigcup_{Y \in X_M} \bigcup_{i \in I} C_i^1(Y) \ \forall X \in ML(G); \\ D(C_v(X)) \cap C(X) \neq \emptyset \ \forall X \in ML(G). \end{array} \right. \quad (14)$$

Рассмотрим синтетическую РФВ $[V(\cdot), K(H), C(\cdot), B(G)]$ как результат объединения координатных РФВ $\{[V_i(\cdot), K_i(H_i), C_i(\cdot), B_i(G_i)], i \in I\}$ и ФВ $[D(\cdot), ML(G)]$ при соблюдении определенных критериев (14).

Обратная задача синтеза знаний (ОЗСЗ)

Задача синтеза знаний (ОЗСЗ) в обратном направлении ставит перед собой цель – определить координатные знания на основе заданных синтетических знаний и правил их согласования [12]. В целом обратная задача ОЗСЗ заключается в разбиении общей концепции выбора системы на более мелкие концепции выбора подсистем. Согласованное объединение этих частных концепций должно привести к восстановлению исходной концепции.

Базы знаний структурируются с помощью функций, определяющих выбор.

$$\{C(\cdot), B(G)\} \{B_i(G_i)\}, i \in \{1, 2, \dots, n\}, \{D(\cdot), M(G)\}, \quad (15)$$

где $C(\cdot), C_i(\cdot), D(\cdot)$ – синтетическая координатная ФВ и ФВ принципов согласования;

$G = \prod_{i \in I} G_i, I \in \{1, \dots, n\}$ – альтернативы ФВ, G_I ;

$i \in I$ – альтернативы i -й ФВ;

$B(G) \subseteq 2^G$ и $B_i(G_i) \subseteq 2^{G_i}$ – варианты выбора: синтетические или координатные ФВ;

$MS(G)$ – список опций для настройки согласования (взаимосвязь $MS(G)$ с другими свойствами баз знаний определяется эмпирически, как правило $MS(G) = ML(G)$).

Различные варианты $X \in B(G), X_i \in B_i(G_i), X \in MS(G)$ обозначим как синтетические и координатные представления ФВ, а также функцию, обеспечивающую их согласование $D(\cdot)$.

В семействах $[D(\cdot, a), B(G), a \in A]$, где $[D(\cdot, a), B(G), a \in A], \forall a \in A$ параметрическая функция выбора (ПФВ) определяет выбор, имея собственное поле параметров.

Рассмотрим синтетическую функцию ФВ, обозначенную как $C(\cdot), B(G)$, и атомную решетку $\mathcal{T}(G)$, представленную множеством $ML(G)$ молекул. Спектр $[C(\cdot), B(G)], \{B_i(G_i), i \in I\}$, который является набором проекций $B(G), I = \{1, 2, \dots, n\}$, связан с множеством индексов, $G = \prod_{i \in I} G_i$ образуемых декартовым произведением конечных множеств [12].

Рассмотрим следующие условия согласования:

$$\left\{ \begin{array}{l} X \cap A \subseteq D(X, A) \subseteq X \ \forall A \subseteq G \ \forall X \in ML(G); \\ D(X, \prod_{i \in I} C_i(Pr_i X)) \cap C(X) \neq \emptyset \ \forall X \in ML(G). \end{array} \right. \quad (16)$$

Тогда заданы:

1) задача синтеза знаний в обратном порядке предполагает поиск набора фактов ФВ $\{C_i(\cdot), B_i(G_i), i \in I\}$, который соответствует заданным критериям (16);

2) для поиска подходящего набора РФВ $\{[V_i(\cdot), B(G), C_i(G_i)]\}$ необходимо применить расширенную ОЗСЗ, соответствующую (16);

3) ОЗСЗ параметрического характера, если необходимо определить ПФВ $\{[C_i(\cdot, a), B_i(G_i), a \subseteq G, i \in I]\}$, который соответствует заданным критериям (16).

Решение, принятое с помощью ФВ, связывается с конкретным лицом, ответственным за принятие решения (ЛПР). После того как оптимальное решение ОЗСЗ будет найдено, работа ФВ, то есть синтез выбора, прекращается [13]. Вместо этого наступает этап выбора в рамках координатных полей и последующего согласования.

Задача согласования знаний (ЗСЗ)

В процессе синтеза знаний концепция согласования выполняет функцию, аналогичную понятиям равновесия, компромисса и справедливости в рамках теории принятия решений. В контексте выбора она отражает субъективное восприятие принимающего решение индивида о достижении компромисса или справедливого результата. При синтезе знаний это выражается как оценка

эксперта высокого уровня, касающаяся качеств синтезированных знаний, которые формируются из координатных данных. Целью процесса согласования является определение согласованных параметров, которые одновременно логически обоснованы и воспринимаются как разумные [14]. Эти параметры представляются в форме функции выбора.

В рамках двумерной ПЗСЗ задача заключается в генерации синтетических функций (синтетической функциональной зависимости) на основе заданных координатных данных $[C_i(G_i), B_i(G_i)]$, $i = 1, 2$ и заранее определенных правил согласования.

Пусть $\mathcal{T}(G_1, G_2)$ – синтетические знания, формирующиеся в рамках структуры атомной решетки, а $\hat{\mathcal{T}}(G_1, G_2)$ – ее расширение.

Обозначим для любого

$$Z \subseteq G = G_1 \times G_2$$

через M_Z молекулу, состоящую из атомов, чьи области влияния частично перекрываются Z , а через N_Z – молекулу, содержащую атомы, входящие в Z .

В рамках данного рассмотрения мы принимаем за основу, что функция ФВ, отвечающая за согласование, подчиняется следующим зависимостям:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{T}(G_1, G_2) \subseteq B(G) = B(G_1, G_2) \subseteq \hat{\mathcal{T}}(G_1, G_2); \\ \forall X, Y \subseteq \mathcal{T}(G_1 \times G_2), C(X \times Y) = C_1(X) \times C_2(Y); \\ \quad \forall Z \subseteq B(G) \ M_Z, N_Z \subseteq B(G); \\ \text{если } Z \text{ — молекула, то и } C(Z) \text{ — молекула.} \end{array} \right. \quad (17)$$

Условия [14]:

1) это подразумевает, что каждый атом может быть включен в синтезированную ФВ и одновременно каждый раз при формировании ФВ $C(\cdot)$ обязательно присутствует как минимум один атом;

2) атом характеризуется только координатами ФВ, которые независимо друг от друга определяют его состояние;

3) подразумевает, что каждая демонстрация приближается к реализации с помощью молекул;

4) неделим и неразложим.

В рамках формально расширенной задачи мерного синтеза знаний цель заключается в вычислении координатных РФВ:

$$[V_i(\cdot), K_i(H_i), C_i(\cdot), B_i(G_i)], \quad i \in I = \{1, 2, \dots, n\},$$

синтетической ФВ:

$$[V(\cdot), K(H), C(\cdot), B(G)],$$

исходя из имеющихся данных, при соблюдении установленных ограничений.

$$\left\{ \begin{array}{l} G = \prod_{i \in I} G_i, H = \prod_{i \in I} H_i; \\ \{Z: Z = \prod_{i \in I} Z_i, Z_i \in K_i(H_i), i \in I\} \subseteq K(H); \\ \{X: X = \prod_{i \in I} X_i, X_i \in B_i(G_i), i \in I\} \subseteq B(G); \\ \forall X = \prod_{i \in I} X_i \in B(G) C(X) \cap \prod_{i \in I} C_i X_i = \emptyset. \end{array} \right. \quad (18)$$

Это актуально при условии соблюдения определенных принципов, на которых основывается согласование.

Рассмотрим условия, при которых возможно согласование. Предполагается, что каждый элемент атомной решетки $\mathcal{T}(G)$ можно представить как результат операции декартового произведения координатных полей выбора.

Ввиду многогранности понятий атомной решетки каждая функция ФВ $[D(\cdot), ML(G)]$ неразрывно связана с наличием собственной функции согласования.

Если получена функция согласования $[D(\cdot), ML(G)]$:

– синтетическая РФВ $[V(\cdot), K(H), C(\cdot), B(G)]$ представляет собой синтез координатных РФВ $\{[V_i(\cdot), K_i(H_i), C_i(\cdot), B_i(G_i)], i \in I\}$ с функцией согласования $[D(\cdot), M(G)]$, если $C(\cdot)$ совпадает с $D(\cdot)$ на молекулах и выполнены условия (18);

– в случае зафиксированной атомной решетки, при соблюдении определенных критериев (18), то синтетическая РФВ $[V(\cdot), K(H), C(\cdot), B(G)]$ является синтезом координатных РФВ $[V_i(\cdot), K_i(H_i), C_i(\cdot), B_i(G_i)], i \in I$.

Важно подчеркнуть, что в рамках расширенной прямой задачи синтеза $C(\cdot)$ помимо функции потерь также требуется определить отображение $V(\cdot)$.

Если задано $\mathcal{T}_i \subseteq K_i(H_i)$, представляющее собой покрытие H_i , $i \in I$, тогда множество $\prod_{i \in I} \mathcal{T}_i$ $\{S: S = \prod_{i \in I} S_i, S_i \in \mathcal{T}_i, i \in I\}$, элементы которого представляют собой атомы, а их объединения – молекулы.

Тогда $\prod_{i \in I} \mathcal{T}_i$ S -решетка, если $\prod_{i \in I} \mathcal{T}_i \subseteq K(H)$.

Пусть M представит собой совокупность всех молекул $M(\prod_{i \in I} \mathcal{T}_i)$.

Полагаем, что $ML(G) \subseteq B(G)$.

Предположим, что соблюдены следующие условия:

1) $V(S) = \prod_{i \in I} V_i(S_i)$, $C(V(S)) = \prod_{i \in I} C_i(V_i(S_i)) \forall S = \prod_{i \in I} S_i \in \prod_{i \in I} \mathcal{T}_i$;

2) координатные ФВ $C_i(\cdot)$, $i \in I$ обладают свойством строгого наследования.

В этом случае речь идет о синтетической РФВ $[V(\cdot), K(H), C(\cdot), B(G)]$, где аддитивное отображение $M(\prod_{i \in I} \mathcal{T}_i)$ реализуется на монотонной основе $V(\cdot)$.

В свою очередь, ФВ $C(\cdot)$, отвечающая требованию строгих правил наследования, может быть восстановлена с неизменным отношением к параметру $M(\prod_{i \in I} \mathcal{T}_i)$.

Чтобы создать синтетическую РФВ, нужно выполнить ряд последовательных [15] действий (алгоритм 3).

Шаг 1. Представить значения $V(\cdot)$ атомов как результат перемножения координатных представлений $V_i(\cdot)$, а для молекул – суммировать эти значения по аддитивному принципу.

Шаг 2. Определить величины $C(V(\cdot))$ для каждой двухатомной молекулы и составить рейтинг их приоритетности R .

Шаг 3. Выбрать набор индексов, соответствующий заданной входной ситуации на основе ее характеристик $J(S)$. Тогда $C(V(S)) = \bigcup_{J(S)} C(V(S_i))$.

Обратная задача синтеза знаний (ОЗСЗ)

В рамках ОЗСЗ используются заранее определенные синтетические знания, отображаемые синтетической ФВ $C(\cdot)$ в разделе выбора $B(G)$, а также условия согласования $D(\cdot)$, выраженные в виде ФВ согласования или требований к молекулярному набору $ML(G)$, представленному в поле выбора.

В рамках определения необходимо рассматривать координатные представления знаний, предоставляемые ФВ $C_i(\cdot)$ на $B_i(G_i)$, $i \in I$. Задача синтеза знаний, с другой стороны, может быть трактована как разложение единой концепции выбора системы на ее составляющие элементы. Согласованное объединение этих элементов должно обеспечивать восстановление исходной концепции [15].

Базы координатных и синтетических знаний могут определяться, вообще говоря, произвольными ФВ. Функция же согласования $D(\cdot)$ на множестве молекул $ML(G)$ поля выбора $B(G)$ должна по своему содержательному смыслу удовлетворять некоторым минимальным требованиям.

Предположим, что сферы принятия решений по координатным знаниям $B_i(G_i)$ $i \in I$ охватывают проекции G_i на области выбора $B(G)$ синтетических знаний:

$$B_i(G_i) \supseteq Pr_i B(G) = \{Y: Y = Pr_i Z, Z \in B(G)\}, Pr_i Z = Pr_{G_i} Z. \quad (19)$$

Молекулярный уровень $D(\cdot)$ выступает как основа для согласования. В этом контексте единицей измерения служит молекула $D(\cdot)$.

Цель ФВ $D(\cdot)$ – согласовывать концепцию $C(X)$ системы с концепциями $C_i(Pr_i X)$ подсистем.

Ранее было отмечено, что для выполнения функции $D(\cdot)$ согласования не подходят все функции, заданные на $ML(G)$.

Допустимая функция $D(\cdot)$ должна, как минимум, соответствовать следующим требованиям:

$$D(C_v(X)) \cap C(X) \neq \emptyset \forall X \in ML(G). \quad (20)$$

Согласование концепций подсистем должно быть основано на выборе решений, которые входят общий язык у всех участвующих подсистем, хранящих координатные знания. В математическом выражении это правило выглядит как

$$D(X) \subseteq \bigcup_{Y \in X_M} \bigcup_{i \in I} C_i^1(Y) \forall X \in ML(G). \quad (21)$$

ФВ можно понимать как подход к управлению отдельными частями системы, обеспечивающий воплощение задуманной модели ее работы. Важно отметить, что подобный подход управления не всегда применяется.

Для достижения разрешимости ОЗСЗ и успешного формирования функций согласования рекомендуется сделать ряд функциональных возможностей (ФВ), отвечающих за определенные базы знаний, параметрическими. Параметр должен иметь широкий диапазон значений. В таком случае задача согласования трансформируется в задачу настройки подсистем, обеспечивающих воплощение общей концепции системы.

Решение ОЗСЗ, выраженное в виде ФВ, соответствует определенному ЛППР. После определения решения ОЗСЗ синтетическая ФВ заменяется механизмом коллективного принятия решений в рамках координатных областей выбора. Эффективность этого механизма напрямую зависит от уровня информированности участников и их способности к согласованным действиям.

Рассмотрим различные уровни осведомленности относительно предъявлений:

1) **максимальная**, в рамках определенного уровня иерархии ЛППР совпадает с координатами ФВ, имеется возможность представления синтетической ФВ и, при решении расширенной задачи, также и набора $[V_i(X), i \in I]$;

2) **средняя**, в определенный момент времени ЛППР обладает информацией о наборе проекций, отображающих глобальное представление (синтетическую ФВ), $[Pr_i X, i \in I]$ и, в случае расширенной задачи, набор $[V_i(X), i \in I]$;

3) **минимальная**, в определенный момент ЛППР осознает проекцию всемирного представления и, если задача охватывает более широкий спектр $V_i(X)$.

Предполагается, что принятие решений по координатным функциональным возможностям будет осуществляться поэтапно, с возможностью обмена данными между участниками и главным разработчиком системы.

Это означает, что решение задачи оптимизации будет формироваться не только на основе осведомленности координатных ЛППР, но и благодаря взаимодействию между ними. Важно отметить, что конечный результат также будет зависеть от последовательности принятия решений координатными ЛППР.

Предположим, что ОЗСЗ:

а) в кооперативном варианте, где каждый локальный ПР, приняв решение, делится им и своими данными с остальными участниками;

б) если координационные решения принимаются без учета данных от других участников;

в) система функционирует автономно, когда нет передачи данных от главного конструктора к локальным ПР, отвечающим за координацию.

г) в случае централизованной структуры, когда главный конструктор передает данные координационным ЛППР.

Далее будут представлены результаты исследования решений ОЗСЗ, обладающих разными типами информационной организации.

Заключение

В настоящее время для принятия ответственных решений применяются комплексные подходы, объединяющие неформальные знания экспертов, формальные логические конструкции и математические алгоритмы. Системы, поддерживающие принятие решений и экспертные системы, имитируют работу одного специалиста в конкретной области. Однако для разрешения сложных задач, затрагивающих экономику, технику или социальные сферы, часто необходимы знания и опыт целой группы специалистов, обладающих компетенциями в разных областях. Решение сложных задач, которые не под силу одному, даже очень талантливому, специалисту, требует коллективного интеллекта, при этом попытки перепоручить такие задачи различным ботам и нейросетевым моделям приносят прямо противоположный результат. Для эффективного функционирования консилиумов и координационных советов, принимающих групповые решения, необходимы совершенствование существующих процедур и, что особенно важно, научная и техническая база для обогащения и синтеза знаний. Представленные в этой статье задачи и алгоритмы служат фундаментом для создания такой технологии.

Далее будет проанализирована возможность создания систем синтеза знаний, представляющих собой сети согласованных экспертных систем. Эти системы смогут не только имитировать решения гениальных индивидуумов, но и воспроизводить коллективные решения экспертов, обладающих разным опытом в разных сферах сложных проблем. Слияние и интеграция сетей экспертных систем, каждая из которых специализируется на узкой области и охватывает определенный регион, в единую глобальную сеть может стать ключевым фактором в усилении интеллектуальных возможностей человечества и облегчении процесса поиска компромиссных решений на глобальном уровне.

Список литературы

1. Грессер Лаура, Кенг Ван Лун. Глубокое обучение с подкреплением: теория и практика на языке Python. СПб.: Питер, 2022. 416 с.
2. Аверина Т.А., Половинкина А.И., Шумарин В.В. Управление рисками в условиях инновационного развития организации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, № 5. С. 87–89.
3. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Порядина В.Л. Механизмы активной экспертизы в задачах комплексного оценивания // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, № 6. С. 64–66.
4. Белоусов В.Е., Баркалов С.А., Нижегородов К.А. Ресурсно-временной анализ в задачах календарного планирования строительных предприятий // Материалы XVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами». Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2019. Т. 1. С. 98–101.
5. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 2004. 341 с.
6. Галинская А.А. Модульные нейронные сети: обзор современного состояния разработок // Математические машины и системы. 2003. № 3-4. С. 87–102.
7. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. (Научная мысль). ISBN 978-5-16-016217-1. DOI: 10/12737/1087996
8. Вапник В.Н. Восстановление зависимости по эмпирическим данным. М.: Наука, 1979. 295 с.
9. Алгоритмы: построение и анализ: пер. с англ. / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. 2-е изд. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.
10. Белоусов В.Е., Абросимов И.П., Губина О.В. Алгоритм идентификации состояний многоуровневой технической системы с использованием расплывчатых категорий модели представления знаний // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 3. С. 124–129.
11. Белоусов В.Е., Нижегородов К.И., Соха И.С. Алгоритмы получения упорядоченных правил предпочтения в задачах принятия решений при планировании производственных программ // Управление строительством. 2019. № 1 (14). С. 105–110.
12. Jordan M.I. Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine // The Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Amherst, MA, 1986. P. 531–546.
13. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование: учеб. М.: Финансы и статистика, 2001. С. 203–211.
14. Construction project data analysis. URL: <https://www.kaggle.com/code/vadbel66/construction-project-data-analysis> (дата обращения: 09.11.2025).
15. Gymnasium-Robotics is a collection of robotics simulation environments for Reinforcement Learning. URL: <https://robotics.farama.org> (дата обращения: 09.11.2025).

References

1. Gresser Laura, Keng Wang Loong. *Deep learning with a reinforcement: the theory and practice are always on the lips Python*. St. Petersburg: Piter, 2022. 416 p. (In Russ.)
2. Averina T.A., Polovinkina A.I., Shymarin V.V. Management of risks in the conditions of innovative development of organization. *Bulletin of Voronezh state technical university*. 2009;5(5):87–89. (In Russ.)
3. Barkalov S.A., Burkov V.N., Porjadina V.L. Mechanisms of active examination in problems complex estimation. *Bulletin of Voronezh state technical university*. 2009;5(6):64–66. (In Russ.)

4. Belousov V.E., Barkalov S.A., Nizhegorodov K.A. [Resource timing analysis in problems of scheduling of the construction enterprises]. In: *Materials of the XVI All-Russian school conference of young scientists "Management of big systems"*. Tambov: Tambov State Technical University Publ. 2019. Vol. 1. P. 98–101. (In Russ.)
5. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya* [Recognition methods]. Moscow: Vysshaya shkola, 2004. 341 p. (In Russ.)
6. Galinskaya A.A. [Modular neural networks: review of the current state of developments]. *Mathematical machines and systems*. 2003;(3-4):87–102. (In Russ.)
7. 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: Infra-M Publ., 2020. 456 p. (In Russ.) ISBN 978-5-16-016217-1. DOI: 10.12737/1087996
8. Vapnik V.N. *Vosstanovlenie zavisimosti po empiricheskim dannym* [Recovery of dependence according to empirical data]. Moscow: Nauka, 1979. 295 p. (In Russ.)
9. Cormen T., Leiserson Ch., Rivest R., Stein C. *Introduction to Algorithms*. Transl. from Engl. 2nd ed. Moscow: Williams, 2005. 1296 p. (In Russ.)
10. Belousov V.E., Abrosimov I.P., Gubina O.V. [An algorithm of identification of conditions of a multilevel technical system with use of indistinct categories of model of representation of knowledge]. *Proceedings of Voronezh state university. Series: Systems analysis and information technologies*. 2017;(3):124–129. (In Russ.)
11. Belousov V.E., Nizhegorodov K.I., Soha I.S. Algorithms of obtaining the ordered rules of preference in problems of decision-making when planning production programs. *Upravleniye stroitel'stvom*. 2019;1(14):105–110. (In Russ.)
12. Jordan M.I. Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine. In: *The Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Amherst, MA, 1986. P. 531–546.
13. Afanas'ev V.N., Yuzbashev M.M. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye: uchebnyk* [Analysis of time series and forecasting. Textbook]. Moscow: Finansy i statistika, 2001. P. 203–211. (In Russ.)
14. Construction project data analysis. Available at: <https://www.kaggle.com/code/vadbel66/construction-project-data-analysis>. (accessed 09.11.2025).
15. Gymnasium-Robotics is a collection of robotics simulation environments for Reinforcement Learning. Available at: <https://robotics.farama.org>. (accessed 09.11.2025).

Информация об авторах

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; bsa610@yandex.ru.

Белузов Алексей Вадимович, старший преподаватель базовой кафедры кибернетики в системах организационного управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; alexbelousov19@yandex.ru.

Бекирова Ольга Николаевна, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; obekirova@cchgeu.ru

Information about the authors

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; bsa610@yandex.ru.

Alexey V. Belousov, Senior Lecturer of the Basic Department of Cybernetics in Organizational Management Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; alexbelousov19@yandex.ru.

Olga N. Bekirova, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; obekirova@cchgeu.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 19.11.2025

The article was submitted 19.11.2025

АНАЛИЗ ДАННЫХ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В УПРАВЛЕНИИ ТОВАРНЫМИ ЗАПАСАМИ ПРИ ЦЕНЗУРИРОВАННОМ СПРОСЕ

А.А. Микрюков, 9127771067@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4664-6911>

В.В. Захаров, metkol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3321-7156>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Цель исследования. Целью работы является анализ структуры данных и формализация задачи машинного обучения в управлении товарными запасами в условиях отсутствия данных о продажах. Такая ситуация характерна для оптовой торговли и дистрибуции, где доступная для анализа информация описывает не фактический спрос, а лишь наличие складских остатков и цен на определённую дату формирования прайс-листа. **Материалы и методы.** В качестве эмпирической базы использованы ежедневные прайс-листы крупного оптового поставщика автозапчастей, охватывающие более 100 календарных дней наблюдения. На их основе сформированы временные ряды, отражающие динамику доступности складских остатков, цен по отдельным товарным позициям. Применены методы анализа временных рядов, статистического описания данных и выявления структурных особенностей ассортимента. **Результаты.** В процессе накопления и обработки данных была сформирована выборка, включающая в себя 133 852 уникальные товарные единицы. Проведённый анализ показал, что для значительной части товарных позиций характерны длительные периоды отсутствия товара на складе, средняя длительность которых составила 39,3 дня, приводящие к систематическому цензурированию наблюдаемого спроса. Установлено, что львиная доля отсутствия товарных позиций на складе поставщика, а именно 91,7 % длятся не менее 3 дней, 75 % превышают 1 неделю, 55,6 % продолжаются 14 дней и более, используется без учёта эффекта цензурирования, что приводит к искажению оценки спроса и снижению качества управленческих решений. Выявлены количественные характеристики периодов отсутствия товара, подтверждающие необходимость перехода от прямого анализа наблюдаемых величин к моделированию скрытого спроса. **Заключение.** Полученные результаты формируют методологическую основу для разработки моделей машинного обучения, ориентированных на восстановление скрытого спроса и поддержку принятия решений в системах управления товарными запасами. Предложенный подход может быть использован при создании аналитических инструментов и программных библиотек для обработки данных в условиях неполной наблюдаемости.

Ключевые слова: машинное обучение, управление товарными запасами, скрытый спрос, цензурированный спрос, временные ряды

Для цитирования: Микрюков А.А., Захаров В.В. Анализ данных и постановка задачи машинного обучения в управлении товарными запасами при цензурированном спросе // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 3. С. 79–88. DOI: 10.14529/ctcr260307

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260307

DATA ANALYSIS AND MACHINE LEARNING PROBLEM FORMULATION IN INVENTORY MANAGEMENT UNDER CENSORED DEMAND

A.A. Mikryukov, 9127771067@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4664-6911>

V.V. Zakharov, metkol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3321-7156>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The purpose of this study is to analyze the structure of daily supplier price lists and to formulate a machine learning problem for inventory management when direct sales data are unavailable. This setting is typical for wholesale and distribution companies, where the available information reflects

assortment composition, prices, and stock balances rather than actual customer demand. **Materials and Methods.** The empirical basis of the study consists of daily price lists from a large wholesale auto parts supplier covering 113 calendar days of observations. The data were preprocessed by normalizing product records, constructing stable SKU identifiers, and forming daily time series that include stock balances, prices, and product availability indicators. The study applies descriptive statistics, time series analysis, assortment dynamics analysis, and detection of consecutive out-of-stock intervals. Particular attention is paid to distinguishing between two different states: a zero-stock balance for an item still present in the price list and the complete absence of an item from the observed data. **Results.** The processed dataset contains 133,852 unique stock keeping units. For a representative sample of 5,000 SKUs, 36 consecutive zero-stock intervals were identified. The average duration of an out-of-stock period was 39.3 days, the median duration was 25 days, and the maximum duration reached 113 days. It was found that 91.7 % of such periods lasted at least 3 days, 75.0 % exceeded one week, and 55.6 % continued for 14 days or more. These results show that stockouts are not isolated short-term deviations but a systematic source of demand censoring. **Conclusion.** The study demonstrates that direct use of inventory balances or sales observations without accounting for censoring may lead to biased demand estimation and poorer replenishment decisions. The proposed problem formulation provides a methodological basis for developing machine learning models aimed at recovering latent demand and supporting inventory management under incomplete data observability.

Keywords: machine learning, inventory management, latent demand, censored demand, time series, data analysis

For citation: Mikryukov A.A., Zakharov V.V. Data analysis and machine learning problem formulation in inventory management under censored demand. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(3):79–88. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260307

Введение

Управление товарными запасами является одной из ключевых задач в организационных и экономических системах, поскольку напрямую влияет на уровень совокупных издержек, устойчивость цепочек поставок и качество обслуживания клиентов. Классические модели управления запасами, такие как модель экономического размера заказа (англ. Economic Order Quantity, EOQ) и (s, S)-политики (англ. (s, S) inventory policy), широко применяются в теории и практике при условии наличия информации о спросе или продажах [1, 2]. Однако в условиях высокой номенклатурной сложности и нестабильности поставок эффективность таких подходов существенно снижается.

В последние годы методы машинного обучения получили широкое распространение в задачах прогнозирования спроса и управления запасами благодаря способности учитывать нелинейные зависимости, сезонные эффекты и большие объёмы данных [3, 4]. Современные исследования демонстрируют эффективность гибридных моделей, сочетающих статистические методы анализа временных рядов и нейросетевые подходы, в том числе в задачах интеграции прогнозирования в ERP-системы [5]. Вместе с тем подавляющее большинство существующих работ предполагает наличие исторических данных о продажах, которые используются в качестве прямого наблюдения спроса.

На практике, особенно в сегменте оптовой торговли и дистрибуции, данные о фактических продажах часто отсутствуют либо недоступны для анализа. Вместо этого компании располагают ежедневными прайс-листами поставщиков, содержащими информацию об ассортименте, ценах и текущих складских остатках товаров. В подобных условиях спрос не наблюдается напрямую и проявляется в цензурированном виде: при наличии товара на складе возможный спрос частично реализуется, а при его отсутствии остаётся скрытым.

Таким образом, задача управления запасами в таких системах может быть сформулирована как задача восстановления скрытого спроса по косвенным наблюдениям и принятия управленческих решений в условиях неопределённости. Данная постановка принципиально отличается от классических задач прогнозирования временных рядов продаж и требует применения специализированных моделей машинного обучения, способных работать с неполными и цензурированными данными [6, 7].

Целью настоящей работы является анализ структуры данных ежедневных прайс-листов и выявление характерных проявлений цензурированного спроса, а также формирование методоло-

гической основы для дальнейшего применения моделей машинного обучения в задачах управления товарными запасами при отсутствии данных о продажах.

1. Материалы и методы

1.1. Описание данных

В качестве данных для исследования были использованы прайс-листы крупной федеральной оптовой компании, реализующей автозапчасти на территории РФ. Получаемый ежедневно прайс-лист сохраняется в специально разработанном для удобства последующих экспериментов формате.

На данный момент период наблюдений включает в себя более 200 календарных дней с 1 октября 2025 г. и по сегодняшний день (май 2026). Прайс-лист формируется и отправляется оптовым покупателям каждый день и содержит 80–90 тыс. уникальных товаров, каждая строка для которого содержит следующие колонки-атрибуты: бренд, нормированный код производителя (предобработанная строка), код артикула компании (собственный формат для обработки), код производителя, количество (непосредственное количество товара на момент формирования прайс-листа), цена. Все вышеперечисленные характеристики в последующем используются для моделирования и построения признаков, обучения и тестирования разрабатываемых моделей.

Код производителя, он же оригинальные номер детали, используется в качестве уникального идентификатора и соответствует так называемому SKU (от англ. Stock Keeping Unit – товарно-материальная единица, SKU), данный идентификатор используется для формирования временных рядов по каждой товарной позиции (табл. 1).

Таблица 1

Описательная статистика ежедневных прайс-листов

Table 1

Descriptive statistics of daily price lists

Показатель	Среднее	Std	Min	Max
Строк в прайс-листе (n-rows)	92 756	5 900	80 499	98 894
Уникальные товарные единицы в день (n unique sku)	91 981	5 864	79 842	98 151
Доля пропусков qty	0,00279	0,00018	0,00241	0,00316
Доля пропусков price	0	0	0	0
Доля нулевых остатков (qty=0)	0,00279	0,00018	0,00241	0,00316

1.2. Анализ объёма и структуры данных

Проанализировав динамику потока данных, а именно число уникальных SKU (англ. Stock Keeping Unit– товарно-материальная единица, SKU) в день, можно дать положительную оценку количественной и качественной устойчивости экспериментальной базы (рис. 1, 2).

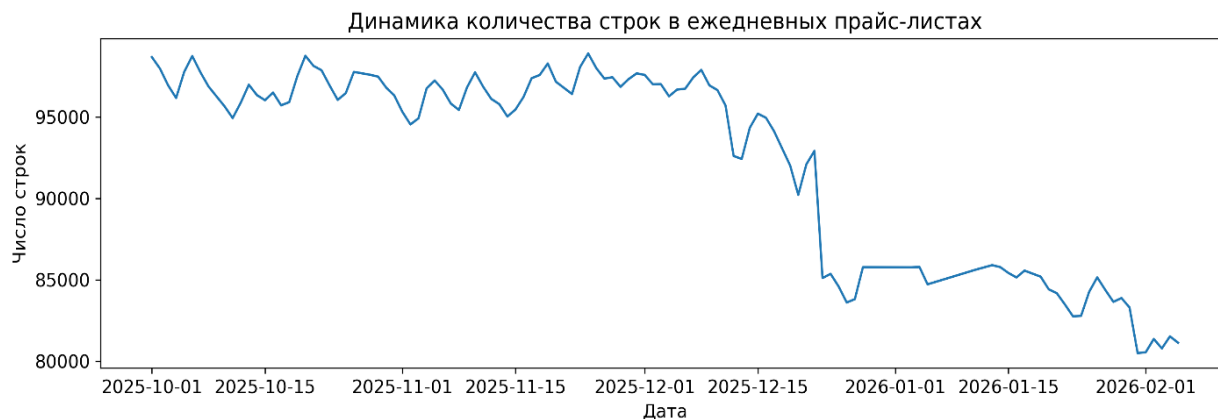


Рис. 1. Динамика количества строк в ежедневных прайс-листах
Fig. 1. Example of a SKU time series: stock balance and price dynamics



Рис. 2. Динамика числа уникальных товарных единиц в день
Fig. 2. Assortment dynamics: SKU appearance and disappearance by day

Проведенный анализ подтверждает, что плавно изменяющийся объём и число уникальных товарных позиций, не имеют резких выбросов, что позволяет рассматривать набор данных как достаточно пригодный для проведения экспериментов с воспроизводимыми временными рядами.

1.3. Формирование временных рядов

В процессе предварительной обработки данных выполнена нормализация товарных позиций: дедубликация, унификация оригинальных кодов, формирование устойчивых идентификаторов. Далее для каждой товарной позиции был сформирован временной ряд с дневной частотой, включающий значения складского остатка, цены и бинарный индикатор доступности товара (табл. 2).

Фрагмент временного ряда товарной позиции (пример)

Таблица 2

Table 2

Fragment of a SKU time series (example)

date	qty	price	available
2025-10-01	2.0	1330.0	1
2025-10-02	2.0	1330.0	1
2025-10-03	2.0	1330.0	1
2025-10-04	2.0	1330.0	1
2025-10-05	2.0	1330.0	1
2025-10-06	2.0	1330.0	1
2025-10-07	2.0	1330.0	1
2025-10-08	2.0	1330.0	1
2025-10-09	2.0	1330.0	1
2025-10-10	2.0	1330.0	1
2025-10-11	2.0	1330.0	1
2025-10-12	2.0	1330.0	1
2025-10-13	2.0	1330.0	1
2025-10-14	2.0	1330.0	1
2025-10-15	2.0	1330.0	1

Сплошная линия на рис. 3 отображает количество складского остатка, пунктирная – цену. Периоды отсутствия товаров на складе соответствуют нулевым значениям остатка, в которых спрос фактически не наблюдается, т. е. является цензурированным.

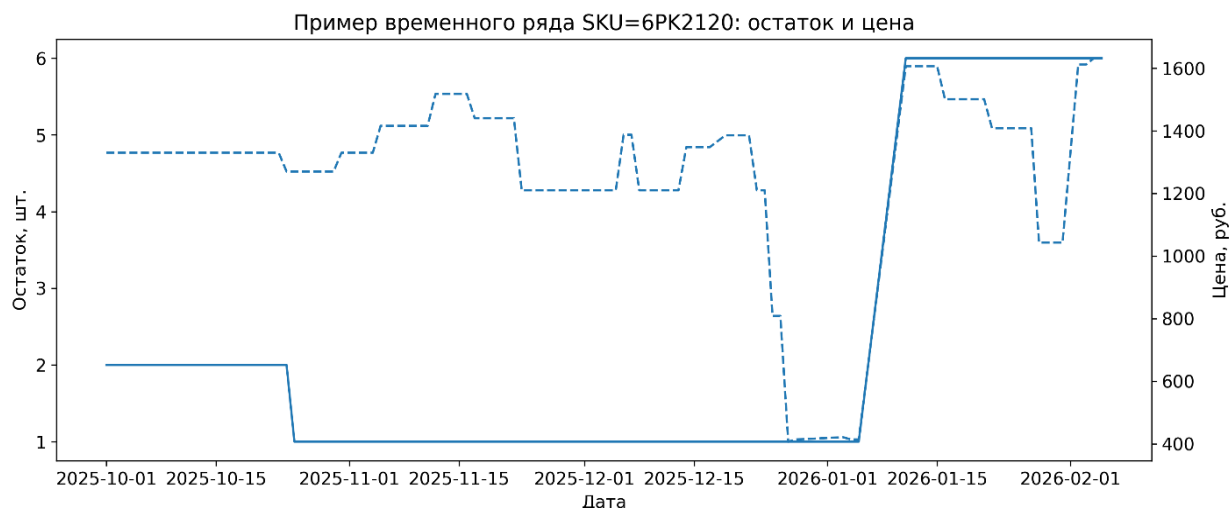


Рис. 3. Пример временного ряда товарной позиции: динамика остатка и цены
Fig. 3. Example of a SKU time series: stock balance and price dynamics

2. Результаты

2.1. Общие характеристики ассортимента

В ходе проведения данного исследования на основе ежедневно накапливаемых прайс-листов был сформирован массив экспериментальных данных, содержащий 133 852 уникальные товарные позиции (SKU) за весь период наблюдений. Последующий анализ длительности периодов отсутствия товара на складе был проведен с использованием репрезентативной выборки из 5000 SKU, которая позволила значительно снизить вычислительную сложность без потери статистической значимости результатов. Данная выборка была сформирована из общего множества товарных позиций, что позволяет охватить весь временной интервал наблюдений и обеспечить сопоставимость результатов и устойчивость оценок.

2.2. Динамика ассортимента во времени

Ассортимент товарных позиций является динамическим, что подтверждает анализ ежедневно поступающих данных, отдельно взятые единицы товара периодически появляются и исчезают. Для количественной оценки этих процессов была проанализирована динамика появления и исчезновения ранее присутствующих на складе предприятия позиций (рис. 4).



Рис. 4. Динамика ассортимента: появление и исчезновение SKU по дням
Fig. 4. Assortment dynamics: SKU appearance and disappearance by day

По данным из прайс-листов можно заметить, что в большинстве дней наблюдается стабильная динамика значительного числа позиций, в то же время длительные периоды полной стабиль-

ности ассортимента отсутствуют, что указывает на необходимость учитывать изменения ассортимента при формировании временных рядов.

Отсутствие товара в прайс-листе не может интерпретироваться как отсутствие спроса на эту товарную единицу и должно рассматриваться как отсутствие наблюдения. Данный факт имеет принципиальное значение для последующих анализа и наблюдения в целом.

2.3. Анализ периодов отсутствия товара на складе

Следующим и не менее важным этапом исследования является анализ периодов отсутствия товара на складе, рассматриваемых в качестве интервалов цензурирования фактического спроса. Для каждой товарной позиции из выборки были зафиксированы периоды, в течение которых складской остаток принимал нулевое значение ($qty = 0$), в результате выявлено 36 отдельных серий дней с нулевым складским остатком.

2.4. Распределение длительности периодов отсутствия товаров

Для оценки характера цензурирования спроса было построено распределение длительности периодов отсутствия товара на складе (рис. 5).

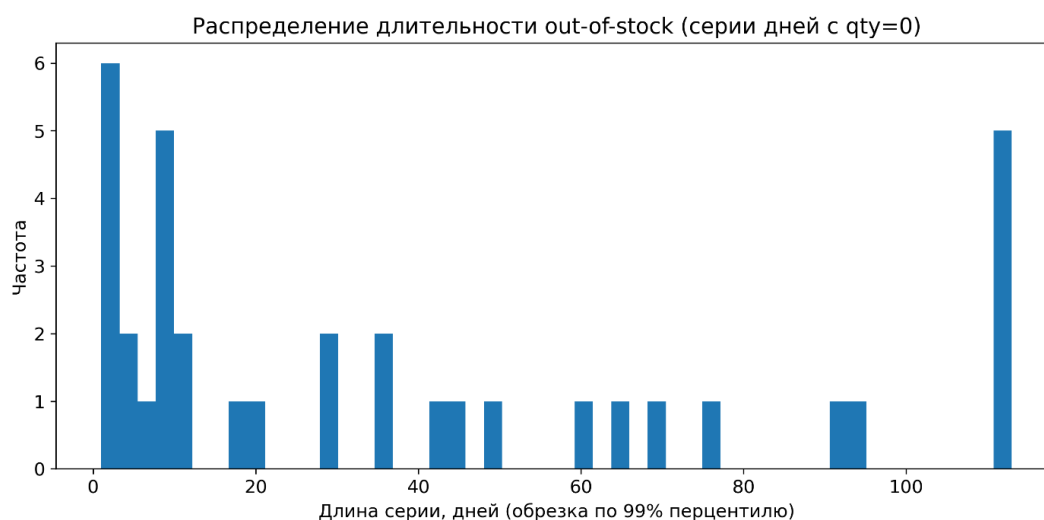


Рис. 5. Диаграмма длительности периодов отсутствия товаров
Fig. 5. Duration diagram of out-of-stock periods

Анализ распределения показывает выраженную асимметрию и наличие длинного правого «хвоста», что свидетельствует о преобладании anomalously затяжных периодов отсутствия товара.

2.5. Количественные характеристики периодов цензурирования

Анализ количественных характеристик длительности периодов отсутствия товара на складе показал, что в среднем товар может отсутствовать в течение 39,3 дня, хотя медианное значение заметно ниже и составляет 25 дней. Максимально зафиксированная продолжительность отсутствия позиций достигла 113 дней. Этому же значению соответствуют 90-й и 95-й перцентили, что совпадает с длиной наблюдаемого временного интервала.

Дополнительно было установлено, что:

- подавляющее большинство периодов отсутствия товара (91,7 %) длятся не менее 3 дней;
- три четверти случаев (75,0 %) превышают одну неделю (7 дней);
- а больше половины (55,6 %) периодов продолжаются 14 дней и более.

Такая длительность периодов отсутствия товара говорит о том, что для значительной части позиций дефицит является не кратковременным отклонением, а устойчиво повторяющимся состоянием.

2.6. Интерпретация результатов в контексте наблюдаемости спроса

Выявленные длительные периоды отсутствия товара на складе приводят к систематическому искажению наблюдаемых данных, где зафиксировать фактический спрос не представляется возможным, а наблюдаемый период продаж содержит структурные разрывы.

Таким образом, прямое использование данных о продажах и остатках товара без поправки на цензурирование может привести к систематической недооценке спроса и формированию

смещённых прогнозов. Поэтому восстановление скрытого спроса – необходимый этап при подготовке данных и применении методов машинного обучения в задачах управления товарными запасами.

3. Обсуждение результатов

3.1. Характер цензурирования спроса в реальных данных

В рассматриваемой системе отсутствие товара на складе оказалось не единичным событием, а устойчиво повторяющимся состоянием. Длительность периодов отсутствия, в среднем превышающая один календарный месяц, а также значительная доля интервалов отсутствия товаров продолжительностью более двух недель указывают на устойчивую проблему неполной наблюдаемости спроса. Сложившаяся ситуация значительно отличается от классических предпосылок теории управления запасами, в которых предполагается либо полная наблюдаемость спроса, либо наличие кратковременных дефицитов, не оказывающих существенного влияния на статистические характеристики временных рядов [5, 8]. В рассматриваемом случае наблюдаемые данные формируются в условиях длительного цензурирования, что приводит к систематическим искажениям при прямом использовании исторических наблюдений.

3.2. Последствия игнорирования цензурированного спроса

Игнорирование эффектов цензурирования спроса при построении прогнозных моделей приводит к накоплению ошибок, которые проявляются на нескольких уровнях. Во-первых, модели прогнозирования, обучаемые на данных с длительными периодами нулевых наблюдений, систематически занижают оценку спроса. Во-вторых, такие искажения транслируются в управленческие решения, связанные с пополнением запасов, что усиливает вероятность повторных дефицитов.

Данный эффект формирует замкнутый контур отрицательной обратной связи: недооценка спроса приводит к недостаточному объёму заказов, что, в свою очередь, увеличивает длительность периодов отсутствия товара. Аналогичные эффекты описываются в работах, посвящённых стохастическому управлению запасами, однако в большинстве исследований предполагается наличие корректных наблюдений спроса [2, 9], что не соответствует условиям, выявленным в настоящем исследовании.

3.3. Методологические аспекты интерпретации данных

В рамках данной работы принципиально различаются два состояния. Первое – это отсутствие товара на складе при сохранении товарной позиции в ассортименте ($qty = 0$) и отсутствие товарной позиции в ежедневном прайс-листе. Второе интерпретируется как отсутствие наблюдения, а не как нулевой остаток. Такое разделение позволяет избежать искусственного удлинения периодов отсутствия товаров и обеспечивает более корректную интерпретацию данных. Такой подход согласуется с практикой анализа динамических ассортиментов и отражает реальные бизнес-процессы в оптовой торговле, где товар может временно выводиться из ассортимента по причинам, не связанным с фактическим спросом. Игнорирование этого фактора приводит к смешению различных режимов наблюдаемости и снижает интерпретируемость результатов анализа.

3.4. Связь полученных результатов с методами машинного обучения

Результаты исследования подчёркивают ограничения традиционных методов анализа временных рядов, основанных на прямом использовании наблюдаемых продаж или остатков. Классические статистические модели прогнозирования, такие как ARIMA (англ. Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA – авторегрессионная модель скользящего среднего) и экспоненциальное сглаживание, предполагают стационарность наблюдаемого процесса и не учитывают наличие длительных периодов цензурирования [1, 2].

Современные гибридные подходы, сочетающие статистические методы и нейросетевые архитектуры, в частности рекуррентные нейронные сети и LSTM (англ. Long Short-Term Memory – сеть долгой краткосрочной памяти), демонстрируют более высокую гибкость при работе с нелинейными и нестационарными данными [3–7]. Однако даже такие модели требуют корректно подготовленных входных данных и явного учёта режимов наблюдаемости спроса.

С учётом выявленных закономерностей следующую задачу машинного обучения целесообразно связывать с восстановлением скрытого спроса. В этом случае модель будет работать не только с видимыми остатками, но и с той частью спроса, которая не попадает в данные в периоды отсутствия товара на складе.

3.5. Практическая значимость и перспективы внедрения

С практической точки зрения предложенная интерпретация данных может быть полезна при доработке корпоративных систем управления запасами. Разделение режимов наблюдаемости и оценка длительности периодов отсутствия товара позволяют точнее готовить данные для алгоритмов, работающих с реальными прайс-листами оптовой торговли.

В дальнейшем этот подход можно использовать при создании программных библиотек и аналитических модулей для подготовки данных, восстановления скрытого спроса и поддержки решений по пополнению запасов. Такой инструментарий соответствует современным тенденциям развития ML-ориентированных систем в логистике и управлении запасами [10, 11], а также требованиям к воспроизводимости и масштабируемости аналитических решений [12].

Заключение

В данной работе проведён анализ структуры и свойств данных ежедневных прайс-листов оптового поставщика в контексте задач управления товарными запасами. Показано, что для значительной части ассортимента характерны длительные периоды отсутствия товара на складе, приводящие к систематическому цензурированию фактического спроса.

На основе реальных данных выявлены количественные характеристики периодов отсутствия товаров, свидетельствующие о том, что нулевые наблюдения не могут интерпретироваться как низкий или отсутствующий спрос. Это делает некорректным прямое применение классических методов прогнозирования и управления запасами без предварительного восстановления скрытого спроса.

Полученные результаты формируют методологическую основу для дальнейших исследований, направленных на разработку моделей машинного обучения, способных работать в условиях неполной наблюдаемости данных [13–15]. Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенного подхода при проектировании аналитических и программных решений для повышения эффективности управления товарными запасами в реальных организационно-экономических системах.

Список литературы

1. Silver E.A. Operations Research in Inventory Management: A Review and Critique // Operations Research. 1981. Vol. 29, no. 4. P. 628–645. DOI: 10.1287/opre.29.4.628
2. Axsäter S. Inventory Control. 3rd ed. Cham: Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-15729-0
3. Gutierrez J.C., Polo Triana S.I., León Becerra J.S. Benefits, challenges, and limitations of inventory control using machine learning algorithms: literature review // OPSEARCH. 2025. Vol. 62. P. 1140–1172. DOI: 10.1007/s12597-024-00839-0
4. Albayrak Ünal Ö., Erkeyman B., Usanmaz B. Applications of Artificial Intelligence in Inventory Management: A Systematic Review of the Literature // Archives of Computational Methods in Engineering. 2023. Vol. 30. P. 2605–2625. DOI: 10.1007/s11831-022-09879-5
5. Микрюков А.А., Гилёв Д.В. Комбинированный метод прогнозирования спроса на продовольственные товары на основе ансамбля LSTM-сети и SARIMA-модели для интеграции в ERP-системы российского ритейла // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 4. С. 122–128. DOI: 10.14529/ctcr250409
6. Bertsimas D., Kallus N. From Predictive to Prescriptive Analytics // Management Science. 2020. Vol. 66, no. 3. P. 1025–1044. DOI: 10.1287/mnsc.2018.3253
7. Ban G.-Y., Rudin C. The Big Data Newsvendor: Practical Insights from Machine Learning // Operations Research. 2019. Vol. 67, no. 1. P. 90–108. DOI: 10.1287/opre.2018.1757
8. Микрюков А.А. Концепция и реализация нового подхода к прогнозированию продаж товарных запасов с использованием методов машинного обучения // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2025. № 5-1. С. 115–119.
9. Cao Y., Shen Z.-J.M. Quantile forecasting and data-driven inventory management under nonstationary demand // Operations Research Letters. 2019. Vol. 47, no. 6. P. 465–472. DOI: 10.1016/j.orl.2019.08.008
10. Chen B. Data-Driven Inventory Control with Shifting Demand // Production and Operations Management. 2021. Vol. 30, no. 5. P. 1365–1385. DOI: 10.1111/poms.13326

11. Supervised learning for integrated forecasting and inventory control / J.F. van der Haar, A.P. Wellens, R.N. Boute, R.J.I. Basten // *European Journal of Operational Research*. 2024. Vol. 319, no. 2. P. 573–586. DOI: 10.1016/j.ejor.2024.07.004
12. Deep reinforcement learning for inventory control: A roadmap / R.N. Boute, J. Gijsbrechts, W. van Jaarsveld, N. Vanvuchelen // *European Journal of Operational Research*. 2022. Vol. 298, no. 2. P. 401–412. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.07.016
13. Inventory – forecasting: Mind the gap / T.E. Goltso, A.A. Syntetos, C.H. Glock, G. Ioannou // *European Journal of Operational Research*. 2022. Vol. 299, no. 2. P. 397–419. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.07.040
14. de Castro Moraes T., Yuan X.-M. Data-Driven Solutions for the Newsvendor Problem: A Systematic Literature Review // *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer, 2021. P. 149–158. DOI: 10.1007/978-3-030-85910-7_16
15. Deep Controlled Learning for Inventory Control / T. Temizöz, C. Imdahl, R. Dijkman et al. // *European Journal of Operational Research*. 2025. Vol. 324, no. 1. P. 104–117. DOI: 10.1016/j.ejor.2025.01.026

References

1. Silver E.A. Operations Research in Inventory Management: A Review and Critique. *Operations Research*. 1981;29(4):628–645. DOI: 10.1287/opre.29.4.628
2. Axsäter S. *Inventory Control*. 3rd ed. Cham: Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-15729-0
3. Gutierrez J.C., Polo Triana S.I., León Becerra J.S. Benefits, challenges, and limitations of inventory control using machine learning algorithms: literature review. *OPSEARCH*. 2025;62:1140–1172. DOI: 10.1007/s12597-024-00839-0
4. Albayrak Ünal Ö., Erkeyman B., Usanmaz B. Applications of Artificial Intelligence in Inventory Management: A Systematic Review of the Literature. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2023;30:2605–2625. DOI: 10.1007/s11831-022-09879-5
5. Mikryukov A.A., Gilev D.V. Combined method for forecasting food product demand based on an ensemble of LSTM network and SARIMA model for integration into ERP systems of Russian retail. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(4):122–128. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250409
6. Bertsimas D., Kallus N. From Predictive to Prescriptive Analytics. *Management Science*. 2020;66(3):1025–1044. DOI: 10.1287/mnsc.2018.3253
7. Ban G.-Y., Rudin C. The Big Data Newsvendor: Practical Insights from Machine Learning. *Operations Research*. 2019;67(1):90–108. DOI: 10.1287/opre.2018.1757
8. Mikryukov A.A. Concept and Implementation of a New Approach to Sales Forecasting in Inventory Management Using Machine Learning Methods. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2025;(5-1):115–119. (In Russ.)
9. Cao Y., Shen Z.-J.M. Quantile forecasting and data-driven inventory management under nonstationary demand. *Operations Research Letters*. 2019;47(6):465–472. DOI: 10.1016/j.orl.2019.08.008
10. Chen B. Data-Driven Inventory Control with Shifting Demand. *Production and Operations Management*. 2021;30(5):1365–1385. DOI: 10.1111/poms.13326
11. van der Haar J.F., Wellens A.P., Boute R.N., Basten R.J.I. Supervised learning for integrated forecasting and inventory control. *European Journal of Operational Research*. 2024;319(2):573–586. DOI: 10.1016/j.ejor.2024.07.004
12. Boute R.N., Gijsbrechts J., van Jaarsveld W., Vanvuchelen N. Deep reinforcement learning for inventory control: A roadmap. *European Journal of Operational Research*. 2022;298(2):401–412. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.07.016
13. Goltso T.E., Syntetos A.A., Glock C.H., Ioannou G. Inventory – forecasting: Mind the gap. *European Journal of Operational Research*. 2022;299(2):397–419. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.07.040
14. de Castro Moraes T., Yuan X.-M. Data-Driven Solutions for the Newsvendor Problem: A Systematic Literature Review. In: *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer, 2021. P. 149–158. DOI: 10.1007/978-3-030-85910-7_16

15. Temizöz T., Imdahl C., Dijkman R., Lamghari-Idrissi D., van Jaarsveld W. Deep Controlled Learning for Inventory Control. *European Journal of Operational Research*. 2025;324(1):104–117. DOI: 10.1016/j.ejor.2025.01.026

Информация об авторах

Микрюков Алексей Александрович, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; 9127771067@mail.ru.

Захаров Вадим Владимирович, ведущий инженер кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; metkol@yandex.ru.

Information about the authors

Aleksey A. Mikryukov, Postgraduate student of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; 9127771067@mail.ru.

Vadim V. Zakharov, Leading engineer of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; metkol@yandex.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 04.05.2026

The article was submitted 04.05.2026

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ТИПА «МОЩНОСТИ»

С.А. Баркалов, sbarkalov@nm.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

П.Н. Курочка, kpn55@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4945-9552>

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Цель исследования. Рассматривается задача формирования проектной команды для выполнения работ заданной трудоемкости в установленные сроки с минимальными затратами. Производительность каждого специалиста моделируется как случайная величина, подчиняющаяся нормальному распределению, что приводит к постановке задачи стохастического программирования с вероятностным ограничением. **Материалы и методы.** Основное внимание уделяется методам редукции стохастической задачи к детерминированному эквиваленту путем преобразования вероятностного ограничения с использованием свойств нормального закона распределения. Такая операция позволяет привести исходную задачу к нелинейной форме. Это обстоятельство исключает применение хорошо апробированных алгоритмов. Основная сложность решения заключается в нелинейности и целочисленности переменных. Исследуются методы линеаризации ограничения, включая разложение в ряд Тейлора и кусочно-линейную аппроксимацию, а также анализируются простые эвристические критерии отбора. В качестве основного метода решения предлагается провести процедуры линеаризации нелинейного ограничения, полученного в результате перехода от вероятностного ограничения в линейной форме к детерминированному варианту, но в нелинейной форме. Описаны подходы к линеаризации нелинейного ограничения, включая разложение в ряд Тейлора и кусочно-линейную аппроксимацию. **Результаты.** Предложены эвристические критерии отбора специалистов, учитывающие их производительность, стоимость и стабильность труда. Вводятся четыре критерия: критерий эффективности, использующий два характеристических параметра: производительность и стоимость; критерий стабильности, учитывающий среднее квадратическое отклонение и производительность; комплексный критерий, являющийся произведением двух первых, и комбинированный критерий, учитывающий все три фактора. Показаны достоинства и недостатки этих подходов к решению исходной задачи. **Заключение.** Показано, что учет стохастического характера отдельных исходных параметров задачи приводит к необходимости решения оптимизационных задач стохастического программирования, что представляет собой определенные сложности. При этом речь о получении аналитических решений уже не идет. На практическом примере показано, что учет стохастичности приводит к увеличению размера команды и затрат по сравнению с детерминированным случаем. Делается вывод о необходимости применения комбинированных критериев и итеративных алгоритмов для получения решений, близких к оптимальным.

Ключевые слова: ресурсы типа «мощности», детерминированная задача оптимизации, стохастическая задача оптимизации, производительность труда, линеаризация, ряд Тейлора, эвристические алгоритмы

Для цитирования: Баркалов С.А., Курочка П.Н. Стохастическая модель распределения ресурсов типа «мощности» // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 3. С. 89–102. DOI: 10.14529/ctcr260308

STOCHASTIC MODEL OF CAPACITY TYPE RESOURCE ALLOCATION

S.A. Barkalov, sbarkalov@nm.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>
P.N. Kurochka, kpn55@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4945-9552>
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Purpose of the study. The problem of forming a project team to complete tasks of a given complexity within a specified timeframe and with minimal costs is considered. The productivity of each specialist is modeled as a random variable obeying a normal distribution, which leads to the formulation of a stochastic programming problem with a probabilistic constraint. **Materials and Methods.** The main attention is paid to methods of reducing a stochastic problem to a deterministic equivalent by transforming a probabilistic constraint using the properties of the normal distribution law. This operation allows us to reduce the original problem to a nonlinear form. This circumstance excludes the use of well-tested algorithms. The main complexity of the solution lies in the nonlinearity and integer nature of the variables. Constraint linearization methods, including Taylor series expansion and piecewise linear approximation, are studied, and simple heuristic selection criteria are analyzed. The proposed main solution method is to linearize the nonlinear constraint obtained by transitioning from a probabilistic constraint in linear form to a deterministic version, but in nonlinear form. The paper describes approaches to nonlinear constraint linearization, including Taylor series expansion and piecewise linear approximation. **Results.** Heuristic criteria for selecting specialists are proposed, taking into account their productivity, cost and labor stability. Four criteria are introduced: an efficiency criterion using two characteristic parameters: productivity and cost; a stability criterion taking into account the standard deviation and productivity; a complex criterion, which is the product of the first two; and a combined criterion taking into account all three factors. The advantages and disadvantages of these approaches to solving the original problem are shown. **Conclusion.** It is shown that taking into account the stochastic nature of individual initial parameters of the problem leads to the need to solve optimization problems of stochastic programming, which presents certain difficulties. In this case, the focus is no longer on obtaining analytical solutions. A practical example demonstrates that accounting for stochasticity leads to increased team size and costs compared to a deterministic case. A conclusion is drawn regarding the need to use combined criteria and iterative algorithms to obtain solutions close to optimal.

Keywords: capacity-type resources, deterministic optimization problem, stochastic optimization problem, labor productivity, linearization, Taylor series, heuristic algorithms

For citation: Barkalov S.A., Kurochka P.N. Stochastic model of capacity type resource allocation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(3):89–102. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260308

Введение

В современных условиях управления проектами особую актуальность приобретают задачи формирования команд, способных выполнить заданный объем работ в договорные сроки при минимизации затрат. Традиционные детерминированные модели предполагают, что производительность каждого специалиста является фиксированной величиной [1, 2]. Однако в реальности производительность труда имеет вероятностную природу, обусловленную такими факторами, как невыходы на работу, колебания эффективности и другие случайные обстоятельства. Это приводит к необходимости использования методов стохастического программирования [3, 4].

Рассмотрим задачу распределения ресурсов типа «мощности», где каждый исполнитель характеризуется случайной производительностью, распределенной по нормальному закону, и стоимостью его труда. [5, 6] Цель состоит в выборе подмножества специалистов, обеспечивающего выполнение работ в заданный срок с заданной вероятностью при минимальных затратах. Формально задача сводится к минимизации линейной целевой функции при вероятностном ограничении, которое после преобразования становится нелинейным детерминированным ограничением, содержащим квадратный корень из суммы дисперсий [7, 8].

Материалы и методы

Рассматривается процесс распределения ресурсов типа «мощности» для выполнения работы определенного вида общей трудоемкостью Q_n за заданный срок T_n [1, 9, 10, 11]. Имеется некоторое количество специалистов, способных выполнить эту работу. При этом один специалист не в состоянии выполнить эту работу в заданные сроки, а все специалисты просто избыточны. То есть число назначенных на работу исполнителей m должно удовлетворять соотношению $1 < m < N$, где N – общее число работников, которых можно выделить для выполнения рассматриваемого объема работ. Каждый исполнитель характеризуется индивидуальной производительностью w_i и оплатой своего труда c_i . Необходимо сформировать временный трудовой коллектив, способный выполнить заданный объем работ в договорные сроки, при этом минимизировав затраты на оплату труда [12].

Для дальнейшего решения определим суммарную сменную производительность создаваемого производственного коллектива, исходя из условий задач

$$W = \frac{Q_n}{T_n}, \quad (1)$$

и введем двоичную переменную x_i , принимающую значение, равное 1 в том случае, если i специалист назначен на выполнение работы и 0 – в противном случае. В этом случае формальная постановка задачи будет иметь следующий вид:

целевая функция задачи –

$$\sum_{i=1}^m c_i x_i \rightarrow \min \quad (2)$$

при следующем ограничении

$$\sum_{i=1}^m w_i x_i \geq W. \quad (3)$$

Задача (2)–(3) относится к классу задач двоичного программирования, алгоритмы решения которой известны [10, 13].

В данном случае достаточно хорошо себя зарекомендовали «жадные» алгоритмы, которые в данном случае предполагают определить для каждого специалиста величину его персональной эффективности, то есть

$$\Xi_i = \frac{w_i}{c_i}, \quad (4)$$

и отбирать исполнителей в порядке убывания этой величины. Получаемое решение, как правило, было близко к оптимальному или же совпадало с ним.

Но это только в том случае, если ограничение (4) приводится в детерминированном варианте. А вот в том случае, когда индивидуальная производительность w_i представляет собой вероятностную величину, решение задачи уже будет затруднено.

И здесь, естественно, встает вопрос о характеристиках функции распределения такой случайной величины, как производительность труда работника. В данном случае ответ на этот вопрос дает следующее утверждение.

Утверждение 1. Производительность труда специалиста является случайной величиной, распределенной по нормальному закону распределения.

Доказательство. Согласно представлениям о реальной производительности труда производственного персонала следует отметить, что ее величина определяется в основном за счет невыхода на работу по различным причинам, но чаще всего за счет болезни и отвлечения на исполнение гособязанностей. А это явление не имеет широкого распространения, что показывает статистическое изучение использования рабочего времени на основании табеля учета рабочего времени – Т-12 и Т-13. Отличаются формы тем, что Т-12 является универсальным вариантом, а Т-13 ведется, если в организации установлена автоматическая система контроля явок-неявок на работу (турникет). Поэтому с большой долей достоверности можно утверждать, что величина производительности труда укладывается в диапазон «трех сигм» и это дает веские основания считать, что изучаемая величина распределена по нормальному закону распределения.

Приведем типичную статистику. Всего в году имеется примерно 250 рабочих дней (количество меняется от года к году, но примерно все крутится около этой цифры). Если иметь в виду конкретного работника, то из этого количества дней необходимо вычесть отпуск 28 рабочих дней. В этом случае баланс рабочего времени для одного работника составит 222 рабочих дня. Если работник использовал все эти дни, то его производительность будет максимальной, а если же он пропустил, то, соответственно, его производительность уменьшится. Например, работник

в течение года отсутствовал на рабочем месте 22 дня. Это достаточно много, так как предполагается, что он за год не работал кроме отпуска еще один месяц, то есть 10 % рабочего времени. Соответственно, его производительность труда может составлять 90 % от его максимальной выработки. Учитывая, что средняя величина производительности в этом случае составляет примерно 1, то диапазон трех сигм будет составлять примерно $1 - 3 \times \sigma$. Откуда находим, что $\sigma = 0,33$.

В итоге задача (2)–(3) преобразуется к задаче с вероятностным ограничением вида

$$P(\sum_{i=1}^m w_i x_i \geq W) \geq \alpha, \quad (5)$$

которое будет означать, что вероятность суммарной производительности назначенных на работу исполнителей будет не меньше директивной величины W , обеспечивающей с заданной вероятностью α выполнения работы в обусловленные договором сроки T_d . Понятно, что к этому ограничению добавляется ограничение на бинарность переменных x_i .

Таким образом, в вероятностной постановке задача сводится к нахождению минимума целевой функции вида (2) при стохастическом ограничении (5).

Такого рода задачи решаются путем редукции стохастического ограничения (5) к детерминированному варианту. Переход может быть осуществлен с учетом утверждения 1 о нормальном распределении производительности труда исполнителей.

Согласно свойствам закона нормального распределения, вероятность попадания исследуемой случайной величины в заданный интервал $P(\sum_{i=1}^m w_i x_i \geq W) \geq \alpha$ может быть преобразована к

виду $\Phi\left(\frac{W - \sum_{i=1}^m w_i x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2 x_i}}\right) \leq 1 - \alpha$, где $\Phi(\dots)$ – функция Лапласа, задаваемая таблично, что эквивалентно следующему выражению:

$$\frac{W - \sum_{i=1}^m w_i x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2 x_i}} \leq z_{1-\alpha}, \quad (6)$$

где $z_{1-\alpha}$ – квантиль стандартного нормального распределения уровня 0,05 берется из таблиц функции Лапласа.

Согласно свойству симметрии функции распределения, справедливо соотношение $z_{1-\alpha} = -z_\alpha$, откуда следует $z_{0,95} = 1,645$, а $z_{0,05} = -1,645$.

Подставим найденные значения в неравенство (6), получим

$$\sum_{i=1}^m w_i x_i - W \geq 1,645 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2 x_i} \text{ или } \sum_{i=1}^m w_i x_i \geq W + 1,645 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2 x_i}. \quad (7)$$

В итоге получили детерминированное ограничение, а сама задача свелась к задаче нелинейного программирования за счет слагаемого в выражении (5), содержащего корень квадратный.

В принципе, задача (2) и (7) решаемая, но только методами нелинейного программирования. Возможен другой подход, основанный на линеаризации нелинейного члена задачи. В данном случае линеаризации должен подвергнуться корень квадратный из выражения (7).

Обозначим подкоренное выражение через V :

$$V = \sum_{i=1}^m \sigma_i^2 x_i. \quad (8)$$

Самый простой способ линеаризации приведенного выше выражения является разложение этого выражения в ряд Тейлора с удержанием в нем первых линейных членов. Для этого необходимо выбрать точку, в окрестности которой и будет осуществляться разложение функции в ряд Тейлора, которую обозначим как V_0 . Успех аппроксимации будет зависеть от того, насколько удачно будет выбрана эта точка.

Но для того чтобы воспользоваться этим способом, необходимо определить значения математического ожидания величины производительности специалиста и ее дисперсию.

Значение математического ожидания хорошо аппроксимируется в этом случае величиной средней производительности, а вот для определения дисперсии воспользуемся правилом «трех сигм», согласно которому практически весь спектр возможных значений, а точнее 99,73 %, укладывается в диапазон трех сигм от математического ожидания. И здесь следует заметить, что на производительность труда работников оказывает влияние множество факторов, но основными являются только два: процент неявок на работу по различным причинам, в основном болезни, и квалификация сотрудника.

Это дает возможность, определив экспертным путем по данным табельного учета организации размах вариации для производительности труда, вычислить среднеквадратическое отклонение (СКО) для определенной группы специалистов, квалификация которых примерно одинакова. Сравнение квалификации удобнее всего осуществлять по затратам на заработную плату для каждой квалификационной группы.

Определив таким образом основные характеристики изучаемой случайной величины – производительности труда, – можно приступить к линеаризации ограничений (5).

Среди наиболее часто используемых методов можно выделить следующие [14, 15]:

1. **Среднее или ожидаемое значение V .** Если имеется возможность получить оценки для величин x_i , то можно оценить ожидаемое значение V , используя среднее значение $V_0 = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2}$.

Теперь возникает задача определения граничных значений для величины V . Для величины $V_{\max}$ это сделать нетрудно, достаточно взять максимально возможное количество специалистов. В этом случае обычно берут всех.

Труднее определить величину $V_{\min}$, так как в этом случае требуется отобрать некоторое количество специалистов так, чтобы срок выполнения работ не превысил директивный, то есть необходимо учитывать имеющееся ограничение. Используя найденную область значений $V \in [V_{\min}, V_{\max}]$, функцию V можно аппроксимировать линейной функцией на этом отрезке, разложив ее в точке V_0 по формуле $\sqrt{V} \approx \sqrt{V_0} + \frac{V - V_0}{2\sqrt{V_0}}$.

Подставляя в ограничение (5), получаем

$$\sum_{i=1}^m w_i x_i \geq W + 1,645 \cdot \left(\sqrt{V_0} + \frac{V - V_0}{2\sqrt{V_0}} \right), \quad (9)$$

где V определяется выражением (8).

Таким образом, исходное нелинейное ограничение вида (7) трансформировалось в линейное ограничение относительно x_i вида (9). Полученную задачу (2), (9) можно решать стандартными методами линейной оптимизации [10, 16].

Следует отметить, что аппроксимация квадратного корня линейной функцией является самым простым способом аппроксимации и допустима только при небольшом разбросе значений исследуемой функции V в интервале исследования. Для широкого диапазона значений функции ограничений возможно использование и других алгоритмов. Например, минимизация ошибки аппроксимации на ожидаемом интервале.

Данный алгоритм используется тогда, когда известен интервал изменения исследуемой величины $[V_{\min}, V_{\max}]$. В этом случае можно выбрать V_0 так, чтобы минимизировать максимальную ошибку аппроксимации на этом интервале. Для функции V наилучшая линейная аппроксимация в смысле минимакса достигается, когда максимальные отклонения на концах равны по модулю. Для этого можно выбрать точку, в окрестности которой будем осуществлять разложение функции в ряд Тейлора в виде $V_0 = \left(\frac{\sqrt{V_{\max}} - \sqrt{V_{\min}}}{1/\sqrt{V_{\max}} - 1/\sqrt{V_{\min}}} \right)^2$.

В том случае, когда требуется решить задачу небольшой размерности, возможен подход, базирующийся на полном переборе вариантов, что дает точное решение задачи. Но для больших задач ($n > 100$) описанные методы аппроксимации позволяют свести задачу к линейному целочисленному программированию, решаемому, например, методом ветвей и границ.

2. **Итеративный подход**, который заключается в том, что полученное решение на базе определения возможного диапазона изменения изучаемой функции используют как начальное приближение V_0 и решают задачу с новым приближением, получая таким образом последующее приближение, которое сравнивают с предыдущим. В том случае, если требуемая для расчетов точность достигнута, вычисление прекращают, если же нет, то продолжают.

В целом надо отметить, что исследуемая функция задачи является достаточно сложной. Во-первых, она дискретна; во-вторых, плохо устойчива: малые изменения начального приближения V_0 приводят к значительным колебаниям в решении; в-третьих, имеет место неоднозначность решения, то есть могут существовать несколько решений с близкой стоимостью, но с разными значениями V . Как правило, в таких случаях приходится применять более сложные методы решения.

3. **Аппроксимация кусочно-линейной функцией**, которая используется в том случае, когда диапазон изменения исследуемой функции V достаточно значительный и применение одной ли-

нейной аппроксимации приводит к существенным ошибкам. В этом случае требуется весь диапазон исследования разбить на несколько участков, построив для каждого свою линейную функцию. То есть подход тесно связан с аппроксимацией линейными сплайнами. Это можно сделать, введя дополнительные переменные.

Алгоритм аппроксимации в этом случае будет следующий:

1-й шаг. Определяем диапазон V . $V_{\min}$ и $V_{\max}$ можно оценить, исходя из минимально возможного и максимально возможного числа специалистов. В качестве минимального значения V рекомендуется принять величину, при которой возможно выполнение ограничения (без учета дисперсии). Для этой цели решают оценочную задачу в линейной постановке без учета нелинейного члена $\sqrt{V}$, то есть ограничение будет детерминированным и иметь вид $M \geq w_n$. Получим некоторый набор, дающий $V_{\min}$. А $V_{\max}$ можно получить, взяв всех доступных специалистов.

2-й шаг. Найденный интервал разбиваем $[V_{\min}, V_{\max}]$ на K отрезков точками $v_0 = V_{\min}, v_1, v_2, \dots, v_K = V_{\max}$. Обычно разбиение равномерное или такое, чтобы $\sqrt{V}$ хорошо приближалась.

3-й шаг. На каждом отрезке $[v_{k-1}, v_k]$ функция $\sqrt{V}$ приближается линейной функцией: $\sqrt{V} \approx a_k V + b_k$, где $a_k = \frac{\sqrt{v_k} - \sqrt{v_{k-1}}}{v_k - v_{k-1}}$, $b_k = \sqrt{v_{k-1}} - a_k v_{k-1}$.

4-й шаг. Таким образом, имеем K отрезков. Для каждого отрезка k мы определяем коэффициенты a_k, b_k , как выше. Мы хотим представить V и $s = \sqrt{V}$ так, чтобы если V лежит в отрезке k , то $s = a_k V + b_k$. Для этого введем бинарные переменные y_k , указывающие, в каком отрезке находится V , и непрерывные переменные λ_{k-1}, λ_k для крайних точек отрезка, такие что $\sum_{j=0}^K \lambda_j = 1$, и переменные V и s представляем как $V = \sum_{j=0}^K \lambda_j v_j$, $s = \sum_{j=0}^K \lambda_j f(v_j)$.

В данном случае следует добавить условие, что не более двух соседних λ_j могут быть положительными. Это можно реализовать с помощью дополнительных бинарных переменных. Для каждого отрезка k (между v_{k-1} и v_k) вводим бинарную переменную y_k и требуем: $\lambda_0 \leq y_1$, $\lambda_j \leq y_j + y_{j+1}$ для $j = 1, \dots, K-1$, $\lambda_K \leq y_K$,

$$\sum_{j=0}^K y_j = 1, \lambda_j \geq 0,$$

тогда V и s выражаются через λ .

После введения переменных и ограничений для кусочно-линейной аппроксимации исходное ограничение становится линейным:

$$M = \sum_{i=1}^m w_i x_i \geq W + z_a s.$$

Теперь задача: минимизировать затраты при линейных ограничениях (включая кусочно-линейную аппроксимацию) и целочисленности x_i . Это задача смешанно-целочисленного линейного программирования (MILP), которую можно решить стандартными методами.

И в данном случае следует иметь в виду, что аппроксимируемая функция $\sqrt{V}$ является вогнутой и, следовательно, аппроксимация будет давать более жесткое ограничение для исходной задачи, что не всегда будет являться приемлемым. Поскольку $\sqrt{V}$ вогнута, кусочно-линейная аппроксимация с интерполяцией между точками дает оценку снизу, так как линейная интерполяция между точками для вогнутой функции дает график, который лежит ниже кривой (хорда ниже графика). Поэтому значение s будет меньше или равно истинному $\sqrt{V}$, что дает заниженное значение $\sqrt{V}$, если V не совпадает с точкой разбиения.

Для преодоления этого затруднения требуется модифицировать ограничение, добавив поправку на максимальную ошибку аппроксимации ε . В этом случае ограничение примет вид $M \geq W + z_a (s + \varepsilon)$, где ε – максимальная ошибка аппроксимации.

Оценить максимальную ошибку ε можно как максимальную разность между $\sqrt{V}$ и линейной интерполяцией на каждом отрезке. Для вогнутой функции максимальная ошибка на отрезке $[a, b]$ достигается в середине. Ошибка находится из следующего выражения:

$$\delta = \max_{V \in [a, b]} [\sqrt{V} - (a_k V + b_k)].$$

Можно взять максимальную δ по всем отрезкам.

Вполне понятно, что чем на большее число отрезков разбить исследуемый диапазон, тем меньше будет ошибка ε .

Таким образом, полная модель с кусочно-линейной аппроксимацией и поправкой на ошибку дает консервативное приближение, гарантирующее выполнение исходного вероятностного ограничения.

Таким образом, кусочно-линейная аппроксимация позволяет свести исходную нелинейную задачу стохастического программирования к задаче смешанно-целочисленного линейного программирования.

Этот метод применим и к задачам большой размерности.

Таким образом, следует сказать, что учет стохастической природы исследуемой задачи вносит достаточно серьезные трудности в процесс ее решения. Как правило, в таких случаях пытаются подобрать эвристический алгоритм решения задачи. В данном случае задача характеризуется двумя критериями оценки выбранного варианта распределения ресурсов – это минимальный размер затрат на формирование команды проекта и выполнение договорных сроков проведения работ. В связи с этим возможно использование двух подходов: по убыванию эффективности, то есть уменьшению отношения (4) – $\Xi_i = w_i/c_i$ [15, 17], или по возрастанию отношения среднеквадратического отклонения к производительности, то есть $D_i = \sigma_i/w_i$. При этом возможно использование и этих двух эвристических правил: вначале выстраивают последовательность специалистов по убыванию эффективности, а затем по возрастанию соотношения дисперсии к производительности.

Понятно, что такой подход достаточно трудоемкий и неоднозначный, поэтому предлагается ввести комплексный критерий, представляющий произведение вышеприведенных критериев $K = \Xi_i \cdot D_i = w_i/c_i \cdot \sigma_i/w_i = \sigma_i/c_i$.

Полученный критерий имеет и достаточно прозрачный физический смысл – это удельная стоимость отклонения производительности труда от ее среднего значения на единицу.

Результаты исследования

Рассмотрим пример использования предлагаемых алгоритмов.

Пример. Предприятию необходимо направить бригаду специалистов для выполнения субподрядных работ на объекте, трудоемкость которых составляет 2500 чел.-смен. Договор предусматривает выполнение данного объема работ за 180 смен, то есть именно в этот период организация должна передать генподрядчику фронт работ для последующей реализации выполняемого проекта. Предприятие располагает 18 специалистами требуемой квалификации, данные о которых приведены в табл. 1 (заданы затраты на привлечение каждого из специалистов: это зарплата – c_i и производительность – w_i).

Исходные данные для примера

Таблица 1

The initial data for the example

Table 1

№ п/п	c_i	w_i	Детерминированное решение	Стохастическое решение	Линеаризация
1	12	2,3	1	1	1
2	12	2,1	1	0	0
3	12	2	0	0	0
4	10	1,9	1	1	1
5	10	1,8	1	1	1
6	10	1,7	0	1	1
7	10	1,6	0	0	0
8	8	1,4	1	1	1
9	8	1,3	0	0	0
10	8	1,2	0	0	0
11	8	1,1	0	0	0
12	8	1,45	1	1	1
13	5	1,1	1	1	1
14	5	1	0	1	1
15	5	0,9	1	1	0
16	5	0,95	1	1	1
17	5	0,85	0	0	1
18	5	0,8	0	0	0
	Сумма	25,45	9/75	10/78	10/78

Необходимо сформировать бригаду, которая могла бы выполнить все работы в заданный срок, при этом затраты на привлечение специалистов должны быть минимальны. Производительность каждого специалиста – случайная величина, распределенная по нормальному закону распределения.

В целях определения суммарной сменной производительности отобранных работников воспользуемся формулой, позволяющей определить эту величину при условии соблюдения договорных сроков строительства. Для условий рассматриваемой задачи, когда общая трудоемкость выполняемых работ равна $Q_n = 2500$ чел.-смен, а договорной срок выполнения работ составляет $T_n = 180$ смен, получаем среднюю величину сменной производительности W

$$W = \frac{Q_n}{T_n} = \frac{2500}{180} \approx 13,9.$$

В том случае, если считать, что производительность каждого работника является детерминированной величиной, мы приходим к стандартной задаче двоичного программирования (2)–(3), точное решение которой приведено в табл. 1.

Если же отказаться от этого предположения, то задача несколько усложняется и принимает вид (2) и (5), превращаясь в задачу уже стохастического программирования.

Одним из способов решения таких задач является редукция выражения, содержащего случайную величину, к детерминированной постановке. Используя свойства нормального распределения, осуществляем это преобразование и приходим к детерминированной задаче с целевой функцией вида

$$\sum_{i=1}^m c_i x_i \rightarrow \min \quad (10)$$

и ограничением в форме

$$\sum_{i=1}^m w_i x_i \geq W + 1,645 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2 x_i}. \quad (11)$$

Таким образом, задача стохастического программирования (2) и (5) трансформировалась в детерминированную нелинейную задачу (10)–(11), решение которой, учитывая непростые свойства исследуемой функции, требует привлечения достаточно сложных алгоритмических методов типа эволюционного поиска.

Точное решение стохастической задачи приведено также в табл. 1. Здесь же представлен и результат решения поставленной задачи путем линейаризации ограничения в форме (11). Анализ полученных решений позволяет сделать вывод о том, что учет стохастичности параметров, как правило, ведет к увеличению ресурсов типа «мощности» в данном случае, здесь имеются в виду привлекаемые к работе специалисты, и, как следствие, в некоторых случаях может привести к росту стоимости выполняемых работ. При этом взять решение для детерминированного варианта нельзя, так как будет нарушаться введенное стохастическое ограничение вида (11). В данном случае вероятностное ограничение будет выполняться практически как равенство, превосходя левую часть на 0,03.

В этой же табл. 1 приведено и решение, полученное по симплекс-методу, для случая, когда нелинейное ограничение вида (11) аппроксимировалось линейаризованным выражением (9). Точность решения в данном случае будет зависеть от выбора точки, в окрестности которой будем раскладывать нелинейный член в ряд Тейлора. В данном случае это можно делать в виде цикла возможных значений, которые может принимать исследуемая величина V_0 . А так как диапазон возможного изменения этой величины небольшой, то и вариантов перебора потребуется не так уж и много. В данном случае за счет удачного выбора точки, в окрестности которой происходило разложение нелинейного члена в ряд Тейлора, решение совпало с точным решением по числу отобранных специалистов и затрат на выполнение работ.

Но в любом случае алгоритмы решения задач со стохастическими параметрами требуют значительной подготовительной работы и весьма трудоемки. Хотелось бы получить алгоритмы простые по процедуре применения, дающие решение, хоть и не оптимальное, но близкое к нему.

В данном случае задача может характеризоваться тремя критериями оценки выбранного варианта распределения ресурсов – это минимальный размер затрат на формирование команды проекта, выполнение договорных сроков проведения работ и риск нарушения договорных сроков, приходящийся на единицу затрат. В связи с этим возможно использование трех подходов: по убыванию эффективности, то есть уменьшению отношения w_i/c_i , по возрастанию отношения

среднеквадратического отклонения к производительности, то есть величины σ_i/w_i и уменьшения риска на единицу затрат σ_i/c_i .

Таким образом, возникает проблема построения комплексного критерия оценки вариантов в оптимизационных задачах. Рассмотрим предложенные критерии и их применимость.

Критерий, характеризующий эффективность конкретного i -го варианта, – w_i/c_i , то есть производительность, приходящаяся на единицу затрат. Данный критерий широко используется, но в нашем случае имеется существенная проблема – не учитывается риск (среднеквадратическое отклонение). Специалист с высокой удельной производительностью w_i/c_i может иметь большую величину среднеквадратического отклонения (СКО) σ_i , что увеличивает вероятность срыва сроков. Второй критерий характеризует стабильность работы специалиста: σ_i/w_i , но не учитывает стоимость. Следовательно, возможно отобрать очень стабильных, но дорогих специалистов. Критерий σ_i/c_i , характеризующий риск на единицу затрат, к сожалению, не учитывает производительность. Можно выбрать дешевых специалистов с малым значением (СКО) σ , но их производительность w может быть недостаточной для выполнения договорных обязательств.

Кроме того, возможность успешного выполнения работ по проекту зависит не только от характеристик конкретного специалиста, но и от параметров других членов команды.

Исходная задача имеет линейную целевую функцию (2) и ограничения с учетом вероятностной природы (5), которые преобразуются к детерминированному варианту (7), превращая задачу в нелинейную. Таким образом, исходная задача имеет линейную целевую функцию (2) и нелинейное ограничение в форме (7). В этом случае оптимальное решение задачи будет находиться на

границе выполнимости соотношения: $\sum_{i=1}^m w_i x_i = W + z_\alpha \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2 x_i} + \varepsilon$, ($\varepsilon \geq 0$).

Для решения поставленной задачи предлагаем использовать комбинированный критерий, позволяющий учесть все три фактора, перечисленные выше:

$$K_i = \frac{w_i - \frac{z_\alpha \sigma_i}{\sqrt{n}}}{c_i}, \quad (12)$$

где n – число специалистов, отобранных для реализации проекта.

Естественно, возникает вопрос о возможности предварительного определения параметра n по заданным начальным условиям задачи. Для этого случая найдем среднюю производительность работника w_{cp} , а затем разделим суммарную сменную производительность команды проекта W на эту величину, получаем $n = \frac{W \cdot N}{\sum_{i=1}^N w_i}$.

Для рассматриваемой задачи $\alpha = 0,95$, $z_\alpha = 1,645$ ожидаемое значение с учетом округления составит $n \approx 10$ (точное значение $n = 9,82318$).

Решим пример с использованием введенных критериев. Результаты применения всех четырех критериев представлены в табл. 2–5. Таким образом, простые эвристики типа w/c или σ/w не гарантируют оптимальности в стохастических задачах с вероятностными ограничениями из-за нелинейности ограничения (корень из суммы дисперсий), взаимосвязи параметров в команде и дискретности переменных.

Таблица 2

Результат применения критерия эффективности

Table 2

The result of applying the efficiency criterion

№ п/п	c_i	w_i	Критерий	Место	$\Xi_i = w_i/c_i$
1	12	2,3	0,1917	3	1
2	12	2,1	0,175	9	1
3	12	2	0,1667	13	0
4	10	1,9	0,19	4	1
5	10	1,8	0,18	7	1
6	10	1,7	0,17	11	0
7	10	1,6	0,16	15	0
8	8	1,4	0,175	10	1
9	8	1,3	0,1625	14	0

Окончание табл. 2
Table 2 (end)

№ п/п	c_i	w_i	Критерий	Место	$\Theta_i = w_i/c_i$
10	8	1,2	0,15	17	0
11	8	1,1	0,1375	18	0
12	8	1,45	0,1813	6	1
13	5	1,1	0,22	1	1
14	5	1	0,2	2	1
15	5	0,9	0,18	7	1
16	5	0,95	0,19	4	1
17	5	0,85	0,17	11	0
18	5	0,8	0,16	15	0
	Сумма	25,45			10/80

Предлагается использовать практический алгоритм отбора на базе критерия вида (12). При этом предполагается следующая схема действий:

1-й шаг. Предварительный отбор (эвристика). Для этого рассчитывается примерное число специалистов, необходимых для реализации имеющегося фронта работ. Для этой цели можно воспользоваться результатами, полученными при решении детерминированной задачи, либо же выбирать специалистов по порядку, пока не выполнится упрощённое ограничение $\sum w_i \geq W$. Можно провести примерный расчет. Для этого необходимо найти среднюю производительность специалиста по всей группе w_{cp} , а затем разделить сменную производительность W на w_{cp} , то есть $n \approx W/w_{cp}$. Для рассматриваемого примера искомый параметр будет равен $n \approx 10$.

Результат применения критерия по отношению среднеквадратического отклонения к производительности

Таблица 3

The result of applying the criterion with respect to the root mean square performance deviations

Table 3

№ п/п	c_i	w_i	σ_i	Критерий	Место	$D_i = \sigma_i/w_i$
1	12	2,3	0,1247	0,0542	1	1
2	12	2,1	0,1247	0,0594	3	1
3	12	2	0,1247	0,0624	5	1
4	10	1,9	0,1118	0,0588	2	1
5	10	1,8	0,1118	0,0621	4	1
6	10	1,7	0,1118	0,0658	6	1
7	10	1,6	0,1118	0,0699	7	1
8	8	1,4	0,1281	0,0915	10	0
9	8	1,3	0,1281	0,0985	11	0
10	8	1,2	0,1281	0,1067	14	0
11	8	1,1	0,1281	0,1164	17	0
12	8	1,45	0,1281	0,0883	8	1
13	5	1,1	0,0986	0,0896	9	0
14	5	1	0,0986	0,0986	12	0
15	5	0,9	0,0986	0,1096	15	0
16	5	0,95	0,0986	0,1038	13	0
17	5	0,85	0,0986	0,116	16	0
18	5	0,8	0,0986	0,1233	18	0
	Сумма	25,45				8/84

2-й шаг. Необходимо вычислить для каждого специалиста величину критерия K_i с учетом найденного значения n и расположить специалистов по убыванию этого критерия.

Результат применения критерия отношения среднеквадратического отклонения к стоимости

Таблица 4

Table 4

The result of applying the ratio criterion the standard deviation to the cost

№ п/п	c_i	w_i	σ_i	Критерий	Место	$K_i = \sigma_i/c_i$
1	12	2,3	0,1247	0,0104	1	1
2	12	2,1	0,1247	0,0104	2	1
3	12	2	0,1247	0,0104	3	1
4	10	1,9	0,1118	0,0112	4	1
5	10	1,8	0,1118	0,0112	5	1
6	10	1,7	0,1118	0,0112	6	1
7	10	1,6	0,1118	0,0112	7	1
8	8	1,4	0,1281	0,016	8	1
9	8	1,3	0,1281	0,016	9	0
10	8	1,2	0,1281	0,016	10	0
11	8	1,1	0,1281	0,016	11	0
12	8	1,45	0,1281	0,016	12	0
13	5	1,1	0,0986	0,0197	13	0
14	5	1	0,0986	0,0197	14	0
15	5	0,9	0,0986	0,0197	15	0
16	5	0,95	0,0986	0,0197	16	0
17	5	0,85	0,0986	0,0197	17	0
18	5	0,8	0,0986	0,0197	18	0
	Сумма	25,45				8/84

3-й шаг. Локальное улучшение. Необходимо проверить полученное эвристическое решение на предмет дальнейшего улучшения.

Результат применения критерия удельной стоимости отклонения
производительности труда от ее среднего значения на единицу

Таблица 5

Table 5

The result of applying the unit cost criterion is the deviation
of labor productivity from its average value per unit

№ п/п	c_i	w_i	σ_i	Критерий	Место	$K_i = \frac{w_i - \frac{z_0 \sigma_i}{\sqrt{n}}}{c_i}$
1	12	2,3	0,1247	0,9946	1	1
2	12	2,1	0,1247	0,9946	2	1
3	12	2	0,1247	0,9946	3	1
4	10	1,9	0,1118	0,9942	4	1
5	10	1,8	0,1118	0,9942	5	1
6	10	1,7	0,1118	0,9942	6	1
7	10	1,6	0,1118	0,9942	7	1
8	8	1,4	0,1281	0,9917	8	0
9	8	1,3	0,1281	0,9917	9	0
10	8	1,2	0,1281	0,9917	10	0
11	8	1,1	0,1281	0,9917	11	0
12	8	1,45	0,1281	0,9917	12	0
13	5	1,1	0,0986	0,9897	13	0
14	5	1	0,0986	0,9897	14	1
15	5	0,9	0,0986	0,9897	15	0
16	5	0,95	0,0986	0,9897	16	0
17	5	0,85	0,0986	0,9897	17	0
18	5	0,8	0,0986	0,9897	18	0
	Сумма	25,45				8/79

Обсуждение и заключение

В работе рассмотрена задача формирования проектной команды в условиях стохастической производительности специалистов. Показано, что учет случайного характера производительности приводит к необходимости решения задачи стохастического программирования с вероятностным ограничением. Преобразование вероятностного ограничения к детерминированному эквиваленту на основе свойств нормального распределения позволяет перейти к задаче нелинейного целочисленного программирования.

Для решения полученной нелинейной задачи предложены методы линеаризации, включая разложение в ряд Тейлора и кусочно-линейную аппроксимацию. Эти методы позволяют свести задачу к линейной форме, пригодной для решения стандартными алгоритмами, однако требуют выбора точки линеаризации и учета ошибок аппроксимации.

Анализ эвристических критериев отбора (таких как отношение производительности к стоимости, отношения СКО к производительности и комплексного критерия) показал, что простые эвристики не гарантируют оптимальности из-за нелинейности ограничений и взаимного влияния параметров команды. Наилучшие результаты достигаются при использовании комбинированного критерия.

Практический пример подтвердил, что учет стохастичности увеличивает размер команды и затраты. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку более эффективных эвристик и алгоритмов для задач большой размерности.

Список литературы

1. 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.
2. Huang W., Li H., Shen Q. Dynamic resource allocation for multi-project construction under uncertainty: A robust optimization approach // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022. Vol. 148 (4). P. 04022003.
3. Математическая модель выбора поставщика металлообрабатывающего оборудования в условиях необходимости достижения технологического суверенитета / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, М.В. Щемлев, А.М. Богер // *Системы управления и информационные технологии*. 2023. № 2 (92). С. 86–92.
4. Sari M., Arditi D. Machine learning-based prediction of labor productivity in construction using site-specific factors // *Construction Management and Economics*. 2021. Vol. 39 (8). P. 755–772.
5. Новиков Д.А., Иващенко А.А. Модели и методы организационного управления инновационным развитием фирмы. М.: КомКнига, 2006. 332 с.
6. Zhang L., Hu Z. Resource leveling in construction projects using hybrid genetic algorithm and discrete event simulation // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 145. P. 104678.
7. Формирование поколений новой техники как задача о покрытии множества / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, П.Н. Курочка, Е.А. Серебрякова // *Проблемы управления*. 2023. № 6. С. 22–32. DOI: 10.25728/ru.2023.6.2
8. Shapiro A., Dentcheva D., Ruszczyński A. *Lectures on Stochastic Programming: Modeling and Theory*. Third Edition. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2021.
9. Balouka N., Cohen I. A robust optimization approach for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem // *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 291, iss. 2. P. 457–470. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.052
10. Pinedo M.L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. Springer International Publishing, 2016.
11. Cheng M.Y., Tran D.H. Fuzzy multi-objective particle swarm optimization for resource allocation in large-scale construction projects // *Applied Soft Computing*. 2021. Vol. 102. P. 107076.
12. 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.
13. Birge J.R., Louveaux F. *Introduction to Stochastic Programming*. Springer Science & Business Media, 2011.
14. Zou P.X.W., Zhang G., Wang J. Understanding the critical factors influencing the design and construction integration process in China // *International Journal of Project Management*. 2018. Vol. 36 (3). P. 468–482.

15. Асатулова Ю.М., Хватова Т.Ю. Повышение инновационной активности предприятий в условиях дефицита финансов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2019. Т. 12, № 1. С. 132–145. DOI: 10.18721/JE.12111
16. Nikakhtar A., Wong K.K., Zavichi K.G. Particle swarm optimization for resource-constrained project scheduling in construction // *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2019. Vol. 26 (7). P. 1388–1408.
17. 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

References

1. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Mailyan L.D., Serebryakova E.A. *Resursnoe planirovanie proektnogo upravleniya: monografiya* [Resource planning of project management: monograph]. Moscow: Kredo; 2024. 530 p. (In Russ.)
2. Huang W., Li H., Shen Q. Dynamic resource allocation for multi-project construction under uncertainty: A robust optimization approach. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022;148(4):04022003.
3. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Shchemlev M.V., Boger A.M. Mathematical model of choosing a supplier of metal-working equipment under the conditions of the necessity to achieve technological sovereignty. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*. 2023;2(92):86–92. (In Russ.)
4. Sari M., Arditi D. Machine learning-based prediction of labor productivity in construction using site-specific factors. *Construction Management and Economics*. 2021;39(8):755–772.
5. 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.)
6. Zhang L., Hu Z. Resource leveling in construction projects using hybrid genetic algorithm and discrete event simulation. *Automation in Construction*. 2023;145:104678.
7. Barkalov S.A., Burkov V.N., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Forming the generations of new technological products as a set covering problem. *Control Sciences*. 2023;(6):18–26. DOI: 10.25728/cs.2023.6.2
8. Shapiro A., Dentcheva D., Ruszczyński A. *Lectures on Stochastic Programming: Modeling and Theory*. Third Edition. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2021.
9. Balouka N., Cohen I. A robust optimization approach for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 2021;291(2):457–470. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.052
10. Pinedo M.L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. Springer International Publishing, 2016.
11. Cheng M.Y., Tran D.H. Fuzzy multi-objective particle swarm optimization for resource allocation in large-scale construction projects. *Applied Soft Computing*. 2021;102:107076.
12. 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: Kredo; 2023. 522 p. (In Russ.)
13. Birge J.R., Louveaux F. *Introduction to Stochastic Programming*. Springer Science & Business Media, 2011.
14. Zou P.X.W., Zhang G., Wang J. Understanding the critical factors influencing the design and construction integration process in China. *International Journal of Project Management*. 2018;36(3):468–482.
15. Asaturova Yu.M., Khvatova T.Y. Improving innovative activity of enterprises in conditions of financial deficit. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2019;12(1):132–145. (In Russ.) DOI: 10.18721/JE.12111
16. Nikakhtar A., Wong K.K., Zavichi K.G. Particle swarm optimization for resource-constrained project scheduling in construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2019;26(7):1388–1408.
17. 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

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.

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.

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 12.01.2026

The article was submitted 12.01.2026

Автоматизированные системы управления технологическими процессами Automated process control systems

Научная статья

УДК 004.9

DOI: 10.14529/ctcr260309

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО КОНТУРА «ТЕМНОЙ ФАБРИКИ» ПРЕССОВОГО ОТДЕЛЕНИЯ

О.В. Логиновский, loginovskii@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

И.К. Гордеев, ik.gordeev@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7560-922X>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Переход прессового отделения огнеупорного производства к модели «темной фабрики» требует не только модернизации оборудования, но и воспроизводимого цифрового описания участка. В условиях действующего производства исходные сигналы, ремонтные записи и сведения о состоянии машин остаются разнородными, поэтому первоочередной задачей становится формирование минимально достаточного наблюдающего контура без раскрытия закрытых технологических данных. **Цель исследования:** предложить методику формирования минимально достаточного событийного цифрового контура прессового отделения огнеупорного производства, необходимого для поэтапного перехода от локальной автоматизации оборудования к модели «темной фабрики» и применимого как стартовый этап диссертационной апробации. **Методы и материалы.** Использованы системный анализ производственного участка, декомпозиция прессово-роботизированной ячейки, событийное моделирование, онтологическое описание ресурсов оборудования, нормирование показателей цифровой наблюдаемости и экспертная классификация сведений, допустимых для открытой публикации. Принцип минимальной достаточности означает включение только тех событий, состояний, параметров и правил, без которых нельзя восстановить состояние участка, проверить качество данных и подготовить основу для диагностики. Предметная область рассмотрена на примере оборудования Laeis и роботизированных комплексов АВВ в производственном контуре Группы «Магнезит» без раскрытия закрытых технологических параметров, рецептур, адресов сигналов и коммерческих показателей. **Результаты.** Обоснована структура контура: объектная модель участка, обязательные события, справочник состояний, правила нормализации записей, интеграционный слой, журнал качества данных и индексы готовности к автономному режиму. Показано, что для действующего промышленного участка с неполными ремонтными журналами первичным результатом должна быть не прогнозная модель отказов, а воспроизводимая методика получения достоверного цифрового следа. Сформулированы требования к наблюдающему прототипу, который фиксирует события пресса и робота без вмешательства в контур управления, задает границы массива Р0 и создает основу для диагностики, технического обслуживания и оценки цифровой зрелости. **Заключение.** Методика переводит инженерное описание прессового отделения в формализованную систему данных, пригодную для диссертационного исследования по специальности 2.3.3 и дальнейшей опытной апробации. До заполнения первичного массива наблюдений Р0 статья не заявляет доказанный экспериментальный, производственный или экономический эффект.

Ключевые слова: автоматизация технологических процессов, темная фабрика, событийный цифровой контур, минимально достаточный контур, огнеупорное производство, прессово-роботизированная ячейка, цифровая наблюдаемость

Для цитирования: Логиновский О.В., Гордеев И.К. Методика формирования цифрового контура «темной фабрики» прессового отделения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 3. С. 103–113. DOI: 10.14529/ctcr260309

Original article
DOI: 10.14529/ctcr260309

METHODOLOGY FOR FORMING THE DIGITAL CONTROL LOOP OF A DARK FACTORY PRESS DEPARTMENT

O.V. Loginovskiy, loginovskii@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

I.K. Gordeev, ik.gordeev@ya.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7560-922X>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Transition of a refractory production press department to a dark factory model demands a reproducible digital description, not only equipment modernization. In an operating plant, signals, maintenance records and machine-state data remain heterogeneous and cannot support diagnostics; therefore, the first task is to form a minimum sufficient observing contour without disclosing restricted technological data. **The research objective.** To propose a methodology for forming a minimum sufficient digital contour of a refractory production press department, required for transition from local automation to a dark factory model and suitable for dissertation approbation. **Methods and materials.** The study uses systems analysis, decomposition of a press and robot cell, ontology-based description of equipment resources, normalization of digital observability indicators and expert classification of information allowed for open publication. Minimum sufficiency means including only events, states, parameters and rules needed to reconstruct the area state, check data quality and prepare diagnostics. The domain is considered using Laeis press equipment and ABB robotic complexes in the Magnezit Group production contour without disclosing restricted parameters, recipes, signal addresses or commercial indicators. **Results.** The contour structure is substantiated: an object model, required events, a state directory, normalization rules, an integration layer, a data quality log and readiness indices. For an operating area with incomplete maintenance logs, the primary result should be not a predictive failure model but a reproducible methodology for obtaining a reliable digital trace. Requirements are formulated for an observing prototype that records press and robot events without affecting the control loop, defines dataset P0 and creates a basis for diagnostics and digital maturity assessment. **Conclusion.** The methodology transforms the engineering description of a press department into a formalized data system suitable for dissertation research in process automation and control. Until dataset P0 is completed, the paper does not claim a proven experimental, production or economic effect.

Keywords: process automation, dark factory, event-driven digital contour, minimum sufficient contour, refractory production, press and robot cell, digital observability

For citation: Loginovskiy O.V., Gordeev I.K. Methodology for forming the digital control loop of a dark factory press department. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2026;26(3):103–113. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260309

Введение

В работах научной школы О.В. Логиновского управление промышленными предприятиями рассматривается как сочетание стратегического, оперативного и информационно-аналитического уровней [1, 2]. Для диссертационной темы, связанной с автоматизацией огнеупорного производства, этот подход важен тем, что позволяет не противопоставлять инженерную практику и научную постановку задачи. Прессовое отделение должно рассматриваться одновременно как технологический объект, как система сбора данных и как элемент общей производственной системы предприятия.

Огнеупорное производство относится к классу технологически сложных систем, в которых качество изделия формируется цепочкой взаимосвязанных операций: подготовкой массы, дозированием, прессованием, манипулированием заготовкой, сушкой, термической обработкой, контролем и логистикой. Для углеродсодержащих MgO-C материалов эта цепочка чувствительна к стабильности рецептуры, режимам уплотнения, состоянию прессовой оснастки и качеству промежуточной транспортировки [3, 4]. Поэтому переход к более высокому уровню автоматизации должен учитывать как предметную специфику огнеупоров, так и логику развития направления Refractories 4.0 [5].

Понятие «темная фабрика» в данной статье используется не как рекламное обозначение полной безлюдности, а как целевое состояние технологического участка, при котором основные опе-

рации могут выполняться без постоянного участия оператора в нормальном режиме, а персонал переходит к ролям настройки, контроля, диагностики, обслуживания и принятия решений при отклонениях. Для такого перехода нужны не только исполнительные механизмы, но и цифровой контур: согласованный набор источников данных, событий, правил, моделей состояния и интерфейсов между АСУ ТП, роботами, производственной аналитикой и системой технического обслуживания.

Цель статьи – предложить методику формирования минимально достаточного событийного цифрового контура прессового отделения огнеупорного производства, пригодную для дальнейшей опытной реализации в условиях Группы «Магнезит» и соответствующую направлению 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

1. Постановка задачи

Прессовое отделение в огнеупорном производстве имеет несколько особенностей, которые отличают его от типовых дискретных участков машиностроения. Во-первых, изделие формируется из массы, свойства которой зависят от состава, влажности, гранулометрии и подготовки. Во-вторых, пресс является одновременно энергетически нагруженной машиной, технологическим исполнительным механизмом и источником диагностических данных. В-третьих, роботизированный контур выполняет не только транспортную, но и стабилизирующую функцию: он снижает вариативность манипулирования сырцом, но сам становится источником новых отказов и отклонений.

При переходе к «темной фабрике» возникает противоречие. С одной стороны, современные прессы, роботы, контроллеры, приводы и SCADA-системы уже генерируют большое число сигналов. С другой стороны, эти сигналы часто остаются локальными: они используются для управления циклом конкретной машины, но не формируют целостной картины состояния участка. Журналы ремонтов и ручные записи, если они ведутся номинально, не могут служить надежной основой для построения предиктивных моделей. Поэтому первым научно-практическим результатом должна стать не «нейросеть для ремонта», а воспроизводимая методика цифрового описания участка.

Задача формулируется следующим образом. Для прессового отделения требуется построить минимально достаточный событийный цифровой контур $C_{\min}$. В формуле (1) указано, что контур включает только те элементы, без которых нельзя наблюдать цикл участка, восстанавливать его состояние и готовить данные для диагностики: множество технологических объектов O , множество обязательных событий E_{req} , множество параметров P , множество состояний S , набор правил R и набор нормированных показателей K :

$$C_{\min} = \{O, E_{req}, P, S, R, K\}. \quad (1)$$

Такой контур должен обеспечивать:

- регистрацию технологически значимых событий без раскрытия коммерчески чувствительных объемов производства;
- связь событий оборудования с состоянием технологического процесса;
- формирование признаков для диагностики и последующего прогнозирования;
- возможность поэтапной интеграции с АСУ ТП, роботизированными комплексами, производственной аналитикой и системой ТОиР;
- оценку готовности участка к более автономному режиму работы.

В рамках открытой публикации не рассматриваются абсолютные объемы производства, конкретные рецептуры, закрытые режимы, параметры коммерческой эффективности и детализация производственных заданий. Вместо этого применяются нормированные показатели, например доля доступных сигналов, полнота регистрации событий, относительная длительность состояний и индекс готовности данных.

2. Методика формирования цифрового контура

Предлагаемая методика включает семь этапов.

Первый этап – определение границ участка. В границы цифрового контура включаются пресс Laeis, связанные загрузочные и разгрузочные устройства, робот АВВ, шкафы управления,

операторские панели, локальные средства безопасности, линии передачи данных и программные интерфейсы, через которые возможно получить события или параметры. Граница выбирается не по организационному признаку, а по технологическому циклу: от поступления подготовленной массы к прессу до передачи сформованного изделия на следующую операцию.

Второй этап – построение объектной модели. Для каждого объекта фиксируются его роль, уровень управления, доступные сигналы, типы событий и зависимость от соседних объектов. Например, пресс описывается через контуры давления, перемещения, циклов, блокировок, аварий, наладочных режимов и обслуживания. Робот описывается через программу, координатные зоны, захват, состояние контроллера, события безопасности и межмашинное взаимодействие.

Третий этап – классификация событий. Для практического внедрения события целесообразно разделить на технологические, диагностические, организационные и события безопасности. Технологические события отражают выполнение цикла прессования и перемещения изделия. Диагностические события показывают изменение состояния оборудования: предупреждения, аварии, отклонения, сервисные действия. Организационные события связаны с началом смены, переналадкой, остановом, ожиданием задания. События безопасности фиксируют срабатывания блокировок, защитных дверей, световых завес и аварийных цепей.

Четвертый этап – нормализация данных. В разных подсистемах один и тот же факт может иметь разные имена, временные метки и единицы измерения. Поэтому вводится единая структура записи события: идентификатор объекта, тип события, временная метка, состояние до события, состояние после события, источник, достоверность, признак открытости публикации. Последний признак нужен для отделения данных, которые можно использовать в научной статье, от данных, требующих внутреннего режима доступа.

Пятый этап – формирование онтологической модели ресурсов. Онтологический подход к управлению ресурсом оборудования рассматривается в работах О.В. Логиновского, В.А. Беляковой и А.А. Шинкарева [6]. Для прессового отделения онтология должна включать классы «оборудование», «узел», «сигнал», «событие», «состояние», «операция», «отказ», «действие обслуживания», «ограничение публикации». Это позволяет перейти от разрозненных тегов контроллера к осмысленному представлению технологического участка.

Шестой этап – организация интеграционного слоя. С учетом работ по цифровым двойникам [7–9], гибким производственным линиям [10] и процессно-событийной интеграции [11] интеграционный слой должен выполнять не только сбор данных, но и согласование временных шкал, контроль качества данных, маршрутизацию событий и подготовку признаков для аналитики. Для первого прототипа достаточно реализовать минимальный контур: сбор событий прессы и робота, буфер событий, справочник объектов, витрину нормированных показателей и журнал качества данных.

Седьмой этап – оценка готовности к «темной фабрике». Готовность участка определяется не наличием отдельных автоматизированных машин, а способностью участка поддерживать управляемый режим без ручного восполнения критически важной информации. Поэтому предлагается использовать пять нормированных индексов:

- K_d – полнота данных, доля требуемых сигналов и событий, которые фактически доступны;
- K_q – качество данных, доля записей с корректной временной меткой, источником и допустимым значением;
- K_s – наблюдаемость состояний, доля времени, для которого можно однозначно определить состояние участка;
- K_m – диагностическая пригодность, доля событий, связанных с техническим состоянием оборудования;
- K_a – автономность реакции, доля типовых отклонений, для которых задано правило автоматической или полуавтоматической реакции.

Итоговый индекс цифровой готовности далее формализуется как взвешенная сумма нормированных показателей.

Веса показателей определяются экспертно и уточняются после обследования участка. В открытой публикации значения индексов могут приводиться в обезличенном виде или как относительные уровни: низкий, базовый, достаточный, высокий.

3. Применение к прессовому отделению Группы «Магнезит»

В качестве практического полигона рассматривается прессовое отделение огнеупорного производства, где эксплуатируются прессовое оборудование Laeis и роботы ABB. Для такого участка цифровой контур должен начинаться с событий, которые уже формируются оборудованием и не требуют вмешательства в технологический процесс. Это снижает риск для производства и позволяет быстро получить проверяемый научный результат.

Минимальный набор объектов включает пресс, робот, захват, оснастку, зону загрузки, зону выгрузки, защитный контур, операторскую панель и локальный архив событий. На первом уровне фиксируются состояния «работа», «ожидание», «наладка», «технологический останов», «аварийный останов», «обслуживание», «неопределенное состояние». На втором уровне уточняются причины: ожидание массы, ожидание робота, ожидание освобождения зоны, предупреждение контроллера, отказ датчика, авария привода, срабатывание защиты.

Такой подход позволяет получить несколько проверяемых методических результатов даже до построения сложных моделей машинного обучения. Во-первых, задается единая схема описания простоев и переходов состояний. Во-вторых, появляется возможность отделять технологические причины от причин технического состояния оборудования после заполнения первичного массива наблюдений. В-третьих, формируется база для последующей диагностики и предиктивного обслуживания. В-четвертых, появляется инструмент для научной аргументации: степень цифровой готовности можно обсуждать не качественно, а через определенный набор показателей.

Важно, что предложенная методика не требует раскрытия производственной тайны. Объем выпуска может быть заменен индексом загрузки; конкретные рецептуры – классом изделия; абсолютная длительность цикла – нормированным интервалом; структура коммерческого заказа – обезличенным типом производственной ситуации. Это делает методику пригодной для диссертационной работы и открытых публикаций.

4. Научная новизна и отличие от известных подходов

Большая часть современной литературы по цифровым двойникам и «умному» производству описывает либо общие архитектуры, либо высокотехнологичные производства с развитой цифровой инфраструктурой [9, 10]. В промышленной практике часто наблюдается иной случай: оборудование автоматизировано локально, но цифровой контур участка как управляемая система еще не сформирован. Поэтому перенос общих моделей цифрового двойника на прессовое отделение требует промежуточной методики.

Отличие предлагаемого подхода заключается в трех положениях.

Во-первых, единицей анализа выбран не весь завод и не отдельная машина, а технологически заверченный участок. Это соответствует практической логике внедрения: участок достаточно мал для опытной реализации, но достаточно сложен для научной постановки задачи.

Во-вторых, цифровая зрелость рассматривается через качество событийной модели. Для «темной фабрики» недостаточно знать, что оборудование имеет контроллер или робот. Необходимо доказать, что состояния участка наблюдаемы, события связаны с причинами, а данные пригодны для автоматического принятия решений.

В-третьих, ограничения открытой публикации встроены в методику. Для промышленных предприятий это принципиально: научная работа должна быть воспроизводимой и полезной, но не должна раскрывать коммерческую тайну. Введение признака открытости данных и переход к нормированным индексам позволяют сохранить научную проверяемость без публикации закрытых производственных сведений.

5. Практическая реализация первого прототипа

Первый прототип цифрового контура целесообразно реализовать как наблюдающую систему без управляющего воздействия на оборудование. Его задача – собрать факты, проверить структуру событий и показать ценность данных для инженерной службы. Прототип должен включать:

- карту оборудования и точек данных;
- справочник событий и состояний;
- модуль приема событий от доступных источников;
- хранилище нормализованных записей;

- панель наблюдения за состояниями участка;
- отчет по качеству данных и диагностической пригодности;
- процедуру выгрузки обезличенных показателей для научной работы.

Для инженерной службы такой прототип полезен тем, что показывает реальную картину доступности данных. Если часть критических событий отсутствует или записывается вручную, это фиксируется как разрыв цифрового контура. Если временные метки не согласованы, это становится задачей синхронизации. Если аварии есть, но причины не классифицированы, это становится задачей онтологического описания и уточнения справочников.

На втором этапе прототип может быть расширен до диагностического слоя. Здесь применимы подходы к машинному обучению в задачах качества и технического состояния [12, 13], но только после формирования достоверного набора событий. Преждевременное применение моделей машинного обучения к неполным или номинально заполненным журналам может дать формальный результат, но не создать инженерной ценности.

6. Модель наблюдаемости и показатели готовности

Для прессового отделения введем множество объектов O , множество параметров P , множество событий E , множество состояний S и набор правил R . Объектами являются пресс, робот, захват, оснастка, зоны загрузки и выгрузки, контроллеры, операторские панели и элементы безопасности. Состояние участка в момент времени t задается вектором $S(t)$, потому что простой прессы, ожидание робота, наладка, срабатывание защиты и обслуживание имеют разный производственный смысл.

Цифровая наблюдаемость означает возможность по потоку событий восстановить состояние $S(t)$ с заданной степенью достоверности. Для промышленной системы это практический критерий: если участок нельзя наблюдать, им нельзя устойчиво управлять в автономном режиме, даже если отдельные машины оснащены контроллерами. Полнота регистрации обязательных событий определяется по формуле

$$K_e = |E_{obs}|/|E_{req}|, \quad (2)$$

где E_{obs} – зарегистрированные события; E_{req} – события, необходимые для описания полного цикла.

Качество временной и идентификационной разметки события определяется по формуле

$$K_t = N_{valid}/N_{all}, \quad (3)$$

где N_{valid} – число записей с корректной временной меткой, источником и идентификатором объекта; N_{all} – общее число записей.

Наблюдаемость состояний участка оценивается по формуле

$$K_s = T_{observed}/T_{total}, \quad (4)$$

где $T_{observed}$ – длительность интервалов, для которых состояние участка определяется однозначно; T_{total} – общая длительность окна наблюдения. Эти показатели не раскрывают абсолютные объемы выпуска, рецептуры и структуру заказов, поэтому могут применяться в открытой публикации.

Для оценки готовности к «темной фабрике» используются пять индексов: полнота данных K_d , качество данных K_q , наблюдаемость состояний K_s , диагностическая пригодность K_m и автономность реакции K_a . Итоговый индекс цифровой готовности рассчитывается по формуле

$$K = w_d + w_q + w_s + w_m + w_a, \quad (5)$$

где w_d , w_q , w_s , w_m , w_a – весовые коэффициенты соответствующих показателей. Такая форма удобна для предприятия: она показывает, какой именно элемент цифрового контура ограничивает следующий шаг автоматизации.

7. Архитектура первого прототипа

Первый прототип цифрового контура целесообразно строить как наблюдающую систему без управляющего воздействия на оборудование. Его задача – проверить структуру событий, показать ценность данных для инженерной службы и подготовить основу для дальнейшей диагностики. Прототип включает карту оборудования, справочник событий и состояний, модуль приема

данных, хранилище нормализованных записей, панель состояния участка и отчет по качеству данных.

Интеграционный слой должен учитывать две группы источников. Первая группа – технологические источники: контроллеры пресса, робот АBB, панели оператора, локальные архивы аварий и событий безопасности. Вторая группа – организационно-технические источники: сменные записи, данные обслуживания, отметки наладки, результаты инженерной проверки. Для прессовых машин с ПЛК и частотно-регулируемыми приводами важна корректная фиксация событий цикла [14], а для задач миграции и согласования данных полезен опыт постепенного переноса данных в ERP-проектах [15]. Связь прототипа с системой управления предприятием должна учитывать методологию стратегического, оперативного и интеллектуального управления [16–18].

В отличие от крупной MES-системы, первый прототип не должен сразу закрывать все производственные функции. Его минимальная ценность состоит в другом: выявить недостающие события, несогласованные временные метки, неполные коды причин и участки, где фактическое понимание инженера не подтверждается цифровым следом. Такой результат уже является научно значимым, потому что переводит обсуждение цифровой зрелости из качественной оценки в измеряемую модель.

8. Связь с технологией, ТОиР и качеством

Прессовое отделение является точкой пересечения технической готовности оборудования и стабильности качества формуемых изделий. Для MgO-C материалов важны свойства сырья, углеродная составляющая, условия уплотнения и последующая термическая обработка [19–21]. Поэтому цифровой контур не должен ограничиваться авариями пресса или робота. Он должен фиксировать стабильность цикла, повторяемость состояний, частоту наладок, превышение нормированной длительности ожидания и срабатывания защит.

Связь с ТОиР строится через диагностические события. Если предупреждение повторяется до аварии, оно должно быть связано с узлом, причиной и сервисным действием. Если после обслуживания предупреждение исчезает, событие подтверждает результат действия. Если предупреждение повторяется после обслуживания, это сигнал для уточнения причины или проверки регламента. Современные обзоры по предиктивному обслуживанию и мониторингу состояния показывают, что модели машинного обучения дают устойчивый эффект только при достаточном качестве исходных данных [22–24].

Для роботизированной части участка перспективным является сочетание данных и инженерного знания [25]. Робот в прессовом отделении часто выступает посредником между технологическим оборудованием и логистикой: ошибка робота может выглядеть как простой пресса, а технологическое ожидание может ошибочно трактоваться как проблема робота. Поэтому диагностическая модель должна учитывать взаимодействие пресса, робота, оснастки, зоны безопасности и оператора, а не только отдельные аварии.

9. Ограничения открытой публикации и апробация

Для диссертационной работы на материале действующего предприятия необходимо заранее разделить научную воспроизводимость и производственную конфиденциальность. Не подлежат открытой публикации абсолютные объемы выпуска, структура заказов, конкретные рецептуры, закрытые режимы, экономические показатели, адреса промышленных тегов, настройки контроллеров и детальные графики загрузки оборудования. Эти данные могут использоваться во внутреннем контуре исследования при наличии разрешения, но в статье заменяются нормированными показателями.

Допустимыми для открытой публикации являются типовая архитектура цифрового контура, классы событий, классы состояний, формулы нормированных индексов, логика обследования, обезличенные примеры переходов состояний и общие выводы о применимости методики. Для каждого показателя целесообразно фиксировать уровень доступа: открытый, внутренний инженерный, внутренний управленческий или закрытый.

Опытную апробацию методики предлагается проводить на одной прессово-роботизированной ячейке. На первом этапе составляется паспорт источников данных и справочник событий. На втором этапе в согласованном окне наблюдения собираются события без вмешательства в тех-

нологический процесс. На третьем этапе инженеры цеха и ремонтной службы сопоставляют цифровую классификацию состояний с фактической производственной ситуацией. На четвертом этапе рассчитываются индексы полноты, качества времени, наблюдаемости и диагностической пригодности. До заполнения первичного массива наблюдений Р0 апробация описывается как планируемая методическая проверка; численные выводы о снижении простоев, росте качества или экономическом эффекте не формулируются. Критерием успешности является не заявленный экономический эффект, а воспроизводимость методики и выявление разрывов цифрового контура.

10. Обсуждение результатов

Предложенная методика занимает промежуточное место между общей концепцией цифрового двойника и локальной задачей сбора сигналов. В литературе по цифровым двойникам подчеркиваются моделирование, синхронизация с физическим объектом и поддержка решений [9, 10]. Однако для действующего прессового отделения цифровой двойник не может быть построен без предварительной нормализации событий, проверки качества данных и формализации состояний.

Научная новизна состоит в том, что объектом исследования становится не отдельная машина и не весь завод, а технологически завершенная прессово-роботизированная ячейка как носитель цифрового следа. Дополнительно вводится критерий минимальной достаточности: в контур включаются только те события, состояния, параметры и правила, которые необходимы для восстановления состояния участка и последующей диагностики. Практическая значимость состоит в возможности начать внедрение с небольшого наблюдающего прототипа, который не меняет контур управления, но после заполнения Р0 должен дать измеримые показатели готовности к более автономному режиму.

Для диссертации по специальности 2.3.3 эта методика выполняет роль базового результата и поддерживает первое положение защиты о формировании минимально достаточного событийного цифрового контура: объект – модель – методика – прототип – апробация – оценка. Такой порядок сохраняет инженерную основу работы и одновременно переводит ее в научную форму. Цифровой контур в этой постановке рассматривается не как локальный набор сигналов, а как часть системы управления производством.

Заключение

Предложена методика формирования минимально достаточного событийного цифрового контура прессового отделения огнеупорного производства как основы перехода к перспективной модели «темной фабрики». Методика включает определение границ участка, объектную модель, классификацию событий, нормализацию данных, онтологическое описание ресурсов, интеграционный слой и систему нормированных показателей цифровой готовности. На материале прессового оборудования Laeis и роботов АВВ обосновано, что научно корректный переход к автономизации должен начинаться с наблюдаемости состояний и качества данных, а не с декларации полной безлюдности. Дополнительно сформулированы математическая постановка цифровой наблюдаемости, архитектура первого наблюдающего прототипа мониторинга, классификатор состояний, показатели цифровой зрелости, правила защиты коммерческой информации и план опытной апробации. Методика может использоваться в диссертационной работе, при обследовании производственного участка и при создании первого прототипа цифрового мониторинга в условиях Группы «Магнезит». До заполнения Р0 статья остается методической и не содержит заявлений о доказанном экспериментальном, производственном или экономическом эффекте.

Список литературы

1. Стратегическое и оперативное управление промышленными предприятиями / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко, А.А. Шестаков Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2021. 325 с.
2. Эффективное управление организационными и производственными структурами / О.И. Дранко, О.В. Логиновский, А.А. Шестаков и др. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. DOI: 10.12737/1087996
3. Kundu S., Sarkar R. MgO-C Refractories: A Detailed Review of These Irreplaceable Refractories in Steelmaking // Interceram – International Ceramic Review. 2021. Vol. 70, no. 3. P. 46–55. DOI: 10.1007/s42411-021-0457-9

4. Thermal and mechanical properties of commercial MgO-C bricks / E.R. Benavidez, E. Brandaleze, Y.S. Lagorio et al. // *Matéria* (Rio de Janeiro). 2015. Vol. 20, no. 3. P. 571–579. DOI: 10.1590/S1517-707620150003.0058
5. Refractories 4.0 / R. Steiner, G. Lammer, C. Spiel, C. Jandl // *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2017. Vol. 162, no. 11. P. 514–520. DOI: 10.1007/s00501-017-0675-7
6. Белякова В.А., Логиновский О.В., Шинкарев А.А. Онтологический инжиниринг в управлении ресурсом оборудования наукоемкого производства // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2025. Т. 25, № 3. С. 26–41. DOI: 10.14529/ctcr250303
7. 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
8. Разработка цифрового двойника системы управления испытательного стенда для цифровых измерительных трансформаторов / О.В. Логиновский, Д.В. Топольский, Н.Д. Топольский и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2024. Т. 24, № 3. С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr240301
9. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 21980–22012. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143
10. Digital twins-based flexible operating of open architecture production line for individualized manufacturing / J. Leng, Z. Chen, W. Sha et al. // *Advanced Engineering Informatics*. 2022. Vol. 53. P. 101676. DOI: 10.1016/j.aei.2022.101676
11. Integrating process management and event processing in smart factories: A systems architecture and use cases / R. Seiger, L. Malburg, B. Weber, R. Bergmann // *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. Vol. 63. P. 575–592. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.05.012
12. Tercan H., Meisen T. Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2022. Vol. 33, no. 7. P. 1879–1905. DOI: 10.1007/s10845-022-01963-8
13. Эволюция использования и применения машинного обучения и искусственного интеллекта в разработке корпоративных информационных систем и в системах поддержки принятия решений / А.А. Шинкарев, М.В. Ядрышникова, О.В. Логиновский и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2025. Т. 25, № 4. С. 17–42. DOI: 10.14529/ctcr250402
14. Sowmiya M. Monitoring and control of PLC based VFD fed three phase induction motor for powder compacting press machine // *Proceedings of the 2013 International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*. 2013. P. 90–92. DOI: 10.1109/ISCO.2013.6481128
15. Логиновский О.В., Голубева О.Л. Модель инкрементной миграции данных в проектах внедрения ERP-систем // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2025. Т. 25, № 3. С. 64–76. DOI: 10.14529/ctcr250306
16. Formation of the methodology of strategic and operational management of industrial enterprises in the conditions of global instability / O.V. Loginovskiy, A.V. Hollay, A.L. Shestakov, K.A. Korennaya // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2022. № 2. С. 73–94. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.2.04
17. The mechanisms of smart management for industrial enterprises / V.N. Burkov, O.V. Loginovskiy, O.I. Dranko, A.V. Hollay // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2020. № 1. С. 59–73. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.04
18. Логиновский О.В., Шинкарев А.А., Коваль М.Е. Разработка архитектуры систем информационного поиска на основе очередей сообщений в корпоративных информационных системах // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2021. № 1. С. 119–140. DOI: 10.15593/2499-9873/2021.1.07
19. Mukherjee S., Pramanik S., Mukherjee S. A Comprehensive Review of Recent Advances in Magnesite Carbon Refractories // *Interceram – International Ceramic Review*. 2014. Vol. 63, no. 3. P. 90–98. DOI: 10.1007/BF03401039
20. Ewais E.M.M. Carbon Based Refractories // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2004. Vol. 112, no. 1310. P. 517–532. DOI: 10.2109/jcersj.112.517

21. Improved thermal shock stability and oxidation resistance of low-carbon MgO-C refractories with introduction of SiC whiskers / Y. Chen, J. Ding, C. Deng, C. Yu // *Ceramics International*. 2023. Vol. 49, no. 16. P. 26871–26878. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.05.224
22. From knowledge-based to big data analytic model: a novel IoT and machine learning based decision support system for predictive maintenance in Industry 4.0 / R. Rosati, L. Romeo, G. Cecchini et al. // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. Vol. 34. P. 107–121. DOI: 10.1007/s10845-022-01960-x
23. Nunes P., Santos J., Rocha E. Challenges in predictive maintenance – A review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023. Vol. 40. P. 53–67. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.11.004
24. Surucu O., Gadsden S.A., Yawney J. Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances // *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 221. P. 119738. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119738
25. Data-driven and Knowledge-based predictive maintenance method for industrial robots for the production stability of intelligent manufacturing / X. Wang, M. Liu, C. Liu et al. // *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 234. P. 121136. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.121136

References

1. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.A. *Strategicheskoe i operativnoe upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami* [Strategic and Operational Management of Industrial Enterprises]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ., 2021. 325 p. (In Russ.)
2. Dranko O.I., Loginovskiy O.V., Shestakov A.A., Gollay A.V., Shinkarev A.A. *Effektivnoe upravlenie organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami* [Effective Management of Organizational and Production Structures]. Moscow: Infra-M, 2020. 450 p. (In Russ.) DOI: 10.12737/1087996
3. Kundu S., Sarkar R. MgO-C Refractories: A Detailed Review of These Irreplaceable Refractories. *InterCeram – International Ceramic Review*. 2021. DOI: 10.1007/s42411-021-0457-9
4. Benavidez E.R., Brandaleze E., Lagorio Y.S., Gass S.E., Tomba Martinez A.G. Thermal and mechanical properties of commercial MgO-C bricks. *Matéria (Rio de Janeiro)*. 2015;20(3):571–579. DOI: 10.1590/S1517-707620150003.0058
5. Steiner R., Lammer G., Spiel C., Jandl C. Refractories 4.0. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2017;162(11):514–520. DOI: 10.1007/s00501-017-0675-7
6. Beliakova V.A., Loginovskiy O.V., Shinkarev A.A. Ontology-based equipment resource control in knowledge-intensive manufacturing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):26–41. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250303
7. 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
8. Loginovskiy O.V., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Beliaikov A.E., Beliakova V.A. Development of a digital twin of the control system test bench for digital instrument transformers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240301
9. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access*. 2020;8:21980–22012. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143
10. Leng J., Chen Z., Sha W., Lin Z., Lin J., Liu Q. Digital twins-based flexible operating of open architecture production line for individualized manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*. 2022;53:101676. DOI: 10.1016/j.aei.2022.101676
11. Seiger R., Malburg L., Weber B., Bergmann R. Integrating process management and event processing in smart factories: A systems architecture and use cases. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022;63:575–592. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.05.012
12. Tercan H., Meisen T. Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: a systematic review. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2022;33(7):1879–1905. DOI: 10.1007/s10845-022-01963-8
13. Shinkarev A.A., Iadryshnikova M.V., Loginovskiy O.V., Lazareva S.A., Gubin V.M. Evolution of usage and application of machine learning and artificial intelligence in the development of enterprise information systems and in decision support systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(4):17–42. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250402

14. Sowmiya M. Monitoring and control of PLC based VFD fed three phase induction motor for powder compacting press machine. In: *Proceedings of the 2013 International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*. 2013. P. 90–92. DOI: 10.1109/ISCO.2013.6481128
15. Loginovskiy O.V., Golubeva O.L. Model of incremental data migration in ERP implementation projects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(3):64–76. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250306
16. Loginovskiy O.V., Holloy A.V., Shestakov A.L., Korennaya K.A. Formation of the methodology of strategic and operational management of industrial enterprises in the conditions of global instability. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2022;(2):73–94. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.2.04
17. Burkov V.N., Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Holloy A.V. The mechanisms of smart management for industrial enterprises. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2020;(1):59–73. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.04
18. Loginovskiy O.V., Shinkarev A.A., Koval M.E. Development of architecture of message queue based information search systems for enterprise information systems. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2021;(1):119–140. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2021.1.07
19. Mukherjee S., Pramanik S., Mukherjee S. A Comprehensive Review of Recent Advances in Magnesia Carbon Refractories. *Interceram – International Ceramic Review*. 2014;63(3):90–98. DOI: 10.1007/BF03401039
20. Ewais E.M.M. Carbon Based Refractories. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2004;112(1310):517–532. DOI: 10.2109/jcersj.112.517
21. Chen Y., Ding J., Deng C., Yu C. Improved thermal shock stability and oxidation resistance of low-carbon MgO-C refractories with introduction of SiC whiskers. *Ceramics International*. 2023;49(16):26871–26878. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.05.224
22. Rosati R., Romeo L., Cecchini G., Tonetto F., Viti P., Mancini A., Frontoni E. From knowledge-based to big data analytic model: a novel IoT and machine learning based decision support system for predictive maintenance in Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023;34:107–121. DOI: 10.1007/s10845-022-01960-x
23. Nunes P., Santos J., Rocha E. Challenges in predictive maintenance – A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023;40:53–67. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.11.004
24. Surucu O., Gadsden S.A., Yawney J. Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances. *Expert Systems with Applications*. 2023;221:119738. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119738
25. Wang X., Liu M., Liu C., Ling L., Zhang X. Data-driven and Knowledge-based predictive maintenance method for industrial robots for the production stability of intelligent manufacturing. *Expert Systems with Applications*. 2023;234:121136. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.121136

Информация об авторах

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

Гордеев Иван Константинович, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ik.gordeev@ya.ru.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Ivan K. Gordeev, Postgraduate Student of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ik.gordeev@ya.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 12.01.2026

The article was submitted 12.01.2026

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 подраз рубрики. 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: 454080, г. Челябинск, ул. С. Кривой, 79, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 2.

Адрес издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.

ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»
2026. Том 26, № 3

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 31.07.2026. Дата выхода в свет 21.08.2026. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 13,48. Тираж 500 экз. Заказ 183/200. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.