

# ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

2025  
Т.25, № 4

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

2025

Vol. 25, no. 4

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

КАПУЛИН Д.В., ВОРОНКОВ М.С., РУССКИХ П.А., ДРОЗД О.В., СОБОЛЕВА Е.В. Автоматизированная система сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры в условиях мелкосерийного производства .....	5
ШИНКАРЕВ А.А., ЯДРЫШНИКОВА М.В., ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ЛАЗАРЕВА С.А., ГУБИН В.М. Эволюция использования и применения машинного обучения и искусственного интеллекта в разработке корпоративных информационных систем и в системах поддержки принятия решений .....	17

### Управление в технических системах

ТЕЛЕГИН А.И., ВОЛОВИЧ Г.И., ГУСЕВ Е.В., ПУДОВКИНА С.Г. Интерфейс Х3D-прото- типа схвата манипуляционного робота .....	43
СЕМЕНИЩЕВ Е.А. Повышение качества данных, фиксируемых системой технического зрения установки разварки полупроводниковых кристаллов .....	59

### Управление в социально-экономических системах

БАРКАЛОВ С.А., АВЕРИНА Т.А., ПЕЛИХОВА А.С. Внедрение Lean-инструментов как способ повышения операционной эффективности строительного проекта .....	69
ГОЛУБЕВА О.Л., ГОЛЛАЙ А.В., ЛОГИНОВСКИЙ О.В. Формирование гибридной мето- дологии внедрения ERP-систем для малых предприятий России .....	83
АВЕРИНА Т.А., ВЕРШКОВ Г.П. Выбор оптимального подхода к управлению проектами цифровой трансформации в строительной отрасли .....	96
КРОТОВ Я.Е., РАЗУМОВ В.Г. Поиск функционально-процессных разрывов с использова- нием графов нейронной сети в холакратической организационной системе .....	107

### Краткие сообщения

МИКРЮКОВ А.А., ГИЛЁВ Д.В. Комбинированный метод прогнозирования спроса на про- довольственные товары на основе ансамбля LSTM-сети и SARIMA-модели для интегра- ции в ERP-системы российского ритейла .....	122
--	-----

# CONTENTS

## Informatics and computer engineering

KAPULIN D.V., VORONKOV M.S., RUSSKIKH P.A., DROZD O.V., SOBOLEVA E.V. Automated electronic equipment service system in small-series production .....	5
SHINKAREV A.A., YADRYSHNIKOVA 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 .....	17

## Control in technical systems

TELEGIN A.I., VOLOVICH G.I., GUSEV E.V., PUDOVKINA S.G. Interface of the X3D prototype of the manipulative robot grip .....	43
SEMENISHCHEV E.A. Improving the quality of data recorded by the machine vision system of a contact welding machine for semiconductor crystals .....	59

## Control in social and economic systems

BARKALOV S.A., AVERINA T.A., PELIKHOVA A.S. Implementation of Lean tools as a way to increase the operational efficiency of a construction project .....	69
GOLUBEVA O.L., HOLLAY A.V., LOGINOVSKIY O.V. Development of a hybrid ERP implementation methodology for small enterprises in Russia .....	83
AVERINA T.A., VERSHKOV G.P. Selecting the optimal approach to managing digital transformation projects in the construction industry .....	96
KROTOV Ya.E., RAZUMOV V.G. Search for functional-process gaps using a graph neural network in a holacratic organizational system .....	107

## Brief reports

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 .....	122
---	-----



# Информатика и вычислительная техника Informatics and computer engineering

Научная статья

УДК 658.58

DOI: 10.14529/ctcr250401

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Д.В. Капулин**, *DKapulin@sfu-kras.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-4260-1408>

**М.С. Воронков**, *Mvoronkov-a21@stud.sfu-kras.ru*

**П.А. Русских**, *Prusskikh@sfu-kras.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-2858-2893>

**О.В. Дрозд**, *Odrozhd@sfu-kras.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-7374-253X>

**Е.В. Соболева**, *Esoboleva@sfu-kras.ru*

*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*

**Аннотация.** Данная работа посвящена анализу специфических трудностей, возникающих при сервисном обслуживании радиоэлектронной аппаратуры мелкосерийного производства. В отличие от массового производства, где процессы обслуживания стандартизованы и опираются на статистические данные о распространенных дефектах, мелкосерийное производство характеризуется высоким разнообразием конфигураций и компонентов, что приводит к значительному увеличению сложности диагностики и ремонта. В статье рассматриваются ключевые проблемы, такие как: широкий спектр потенциальных неисправностей, обусловленный уникальными особенностями каждого изделия; сложность дефектации, требующая высокой квалификации персонала и индивидуального подхода к каждому случаю; отсутствие стандартизированных процедур ремонта и необходимость разработки индивидуальных решений для устранения неполадок. Работа анализирует влияние этих факторов на эффективность сервисного обслуживания и затраты, связанные с ним. В заключение предлагаются направления дальнейших исследований, направленные на разработку эффективных стратегий и методов повышения качества и снижения стоимости сервисного обслуживания в условиях мелкосерийного производства радиоэлектронной аппаратуры. **Цель исследования:** оптимизация процессов сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры в условиях мелкосерийного производства с повышением коэффициента восстановления обслуживаемых изделий. **Материалы и методы.** В статье представлены процессы прохождения изделием этапов сервисного обслуживания на предприятии в форме функциональной модели с использованием нотации IDEF0. **Результаты.** Предложенная функциональная модель реализована в системе управления процессами сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры на научно-производственном предприятии «Радиосвязь» (г. Красноярск). Интерфейс предложенной системы позволяет формировать графики восстановления изделий, отслеживать этапы проведения ремонта изделий и принимать корректирующие действия в случае необходимости. **Заключение.** Внедрение данной программной системы позволило значительно увеличить коэффициент восстановления изделий за рассматриваемый календарный период (февраль–апрель 2024 г.). Это свидетельствует о повышении эффективности процессов сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры в условиях мелкосерийного производства в целом.

**Ключевые слова:** автоматизация сервисного обслуживания, управление конструкторской документацией, система управления данными об изделии, прослеживаемость сервисного обслуживания

**Для цитирования:** Автоматизированная система сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры в условиях мелкосерийного производства / Д.В. Капулин, М.С. Воронков, П.А. Русских и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 4. С. 5–16. DOI: 10.14529/ctcr250401

## AUTOMATED ELECTRONIC EQUIPMENT SERVICE SYSTEM IN SMALL-SERIES PRODUCTION

**D.V. Kapulin**, *DKapulin@sfu-kras.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-4260-1408>

**M.S. Voronkov**, *Mvoronkov-a21@stud.sfu-kras.ru*

**P.A. Russkikh**, *Prusskikh@sfu-kras.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-2858-2893>

**O.V. Drozd**, *Odrozdz@sfu-kras.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-7374-253X>

**E.V. Soboleva**, *Esoboleva@sfu-kras.ru*

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

**Abstract.** This work analyzes the specific challenges of servicing small-batch production radio electronic equipment. Unlike mass production, where service processes are standardized and rely on statistical data on common defects, small-batch production is characterized by a high diversity of configurations and components, significantly increasing the complexity of diagnostics and repair. The article examines key problems such as: a wide range of potential malfunctions due to the unique characteristics of each product; the complexity of fault detection, requiring highly qualified personnel and an individual approach to each case; and the lack of standardized repair procedures, necessitating the development of individual solutions for troubleshooting. The work analyzes the impact of these factors on service efficiency and associated costs. The conclusion proposes directions for further research aimed at developing effective strategies and methods to improve the quality and reduce the cost of servicing small-batch radio electronic equipment. **Aim of the study.** Optimization of service maintenance processes for electronic equipment in small-scale production with an increase in the recovery factor of serviced products. **Materials and methods.** The article presents the processes of a product passing through the service maintenance stages at an enterprise in the form of a functional model using the IDEF0 notation. **Results.** The proposed functional model is implemented in the automated electronic equipment service system in small-series production at the Radiosvyaz Scientific and Production Enterprise (Krasnoyarsk). The interface of the proposed system allows generating product recovery schedules, tracking the stages of product repair and taking corrective actions if necessary. **Conclusion.** The implementation of this software system allowed to significantly increase the product recovery rate for the calendar period under consideration (February–April 2024). This indicates an increase in the efficiency of service processes for electronic equipment in small-scale production in general.

**Keywords:** automation of service maintenance, design documentation management, product data management system, service maintenance traceability

**For citation:** Kapulin D.V., Voronkov M.S., Russkikh P.A., Drozd O.V., Soboleva E.V. Automated electronic equipment service system in small-series production. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(4):5–16. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250401

### Введение

В соответствии с национальным стандартом ГОСТ Р ИСО 9000–2015 качество продукции определяется способностью удовлетворять запросы потребителя и включает как выполнение изделием своих функций в соответствии с назначением и их характеристики, так и воспринимаемую ценность и выгоду для потребителя. В условиях конкуренции производитель берет на себя ответственность за поддержание работоспособности выпущенного и проданного изделия в течение всего времени его экономически целесообразной эксплуатации в силу следующих обстоятельств [1–5]:

- 1) отлаженный сервис помогает изготовителю формировать перспективный и стабильный рынок сбыта;
- 2) высокая конкурентоспособность предлагаемых изделий в значительной степени зависит от высококачественного сервиса;
- 3) сервисное обслуживание может рассматриваться как источник прибыли предприятия;
- 4) отлаженные процессы сервисного обслуживания являются одним из условий поддержания репутации предприятия-производителя.

Сфера послепродажного обслуживания становится все более актуальной для производителей готовой продукции. Усиливающаяся международная конкуренция все больше нивелирует различия в качестве и цене. Конечные продукты становятся взаимозаменяемыми с точки зрения клиента. В результате продажи и рентабельность производителей готовой продукции сокращаются. Кроме того, клиенты все чаще требуют конечных продуктов, адаптированных к их индивидуальным потребностям. Добавленная стоимость с точки зрения клиента может быть получена за счет интенсивного послепродажного обслуживания. Благодаря возможности получения относительно высокой прибыли от поставок аксессуаров, запасных частей и послепродажного обслуживания сфера послепродажного обслуживания также считается привлекательной с точки зрения производителя [6–8].

Обслуживающий персонал должен оперативно реагировать на поступающие требования по сервисному обслуживанию. Они должны оперативно рассматриваться с учетом существующих на предприятии правил и методов организации сервисного обслуживания в условиях мелкосерийного производства радиоэлектронной аппаратуры с целью быстрого и эффективного восстановления изделий в заданные сроки [9, 10]. Процессы сервисного обслуживания также включают определение уровня запасов материалов, деталей и сборочных единиц для оказания сервисных услуг, процедуры приема и оформления заказов на сервисное обслуживание изделий. Эти элементы, в свою очередь, влияют на такие показатели, как время выполнения заказа, точность выполнения условий заказа, состояние и качество оказываемых сервисных услуг [11, 12]. Наконец, анализ данных может использоваться для динамического выявления основных неисправностей изделий и прогнозирования их возникновения в различных условиях эксплуатации [13–16].

Одним из показателей эффективности реализации процесса сервисного обслуживания является коэффициент восстановления изделий:

$$V = \frac{K_B}{K_P},$$

где  $K_B$  – количество отгруженных изделий после восстановления;  $K_P$  – количество поступивших изделий на ремонт.

Организацию сервисного обслуживания дополнительно усложняет широкая номенклатура поддерживаемых изделий с их вариантами исполнения и разнообразие отчетной документации. При этом необходимо формирование базы данных сервисного обслуживания и автоматизация сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры в целом.

Предлагаемая автоматизированная система сервисного обслуживания охватывает все этапы прохождения ремонта обслуживаемых изделий и сопутствующие процессы на предприятии, что увеличивает прослеживаемость сервисного обслуживания в целом. Предлагаемая система также позволяет снизить влияние человеческого фактора, простоев в производстве и конфликтных ситуаций между отдельными подразделениями предприятия.

### **Функциональная модель сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры**

Рассмотрим организацию сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры на примере предприятия АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь» (г. Красноярск, Россия). Его основной сферой деятельности является производство систем и аппаратных комплексов передачи данных, тропосферной, спутниковой связи и навигации. АО «НПП «Радиосвязь» является научно-производственным комплексом радиоэлектронной промышленности, в котором проектирование является важным видом деятельности, конечным результатом которого является конструкторская документация на изделие.

В сервисном обслуживании радиоэлектронной аппаратуры участвуют все основные подразделения предприятия. При этом основные процессы реализуются в производственных цехах, складах и отделах: снабжения, качества, рекламационном, внешних работ, планово-производственном, бухгалтерском и экономическом.

Кратко рассмотрим функциональную модель сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры, представленную на рис. 1 в форме диаграммы IDEF0 с учетом покупных комплектующих изделия (ПКИ). На ней показаны все связи процессов, протекающих на предприятии при оказании услуг сервисного обслуживания производимой радиоэлектронной аппаратуры.

На рис. 2 представлена декомпозиция блока «Производство».

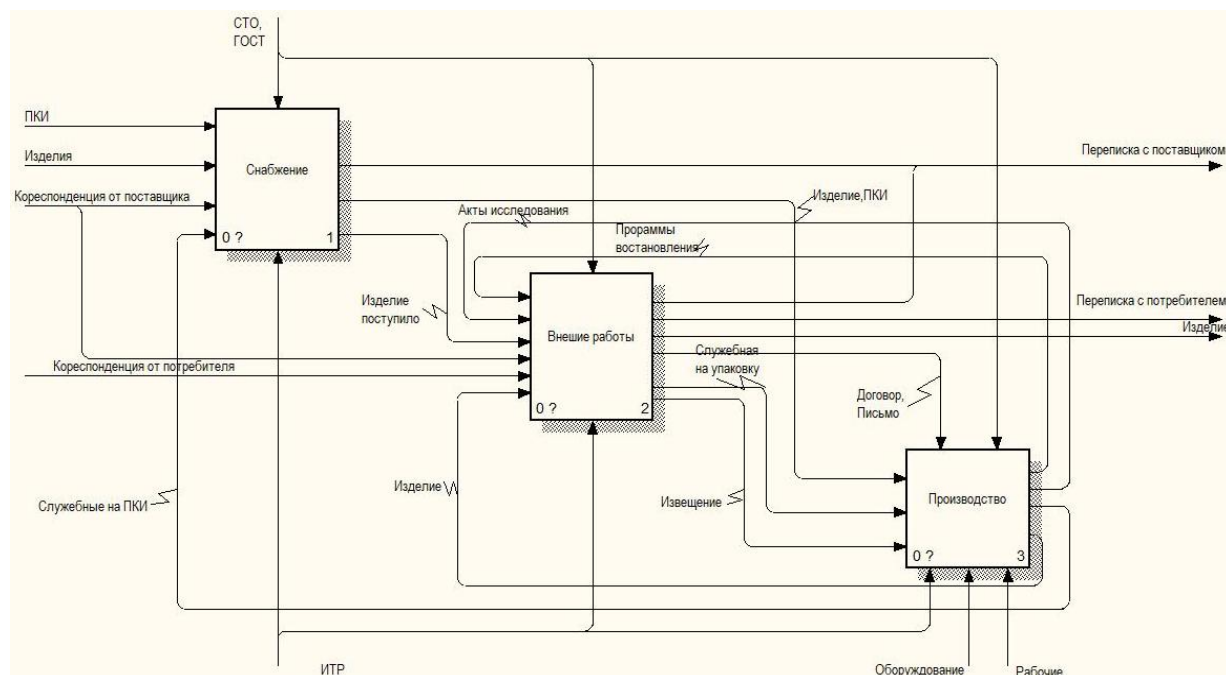


Рис. 1. Функциональная модель процесса сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры  
Fig. 1. Functional model of the radio-electronic equipment service maintenance process

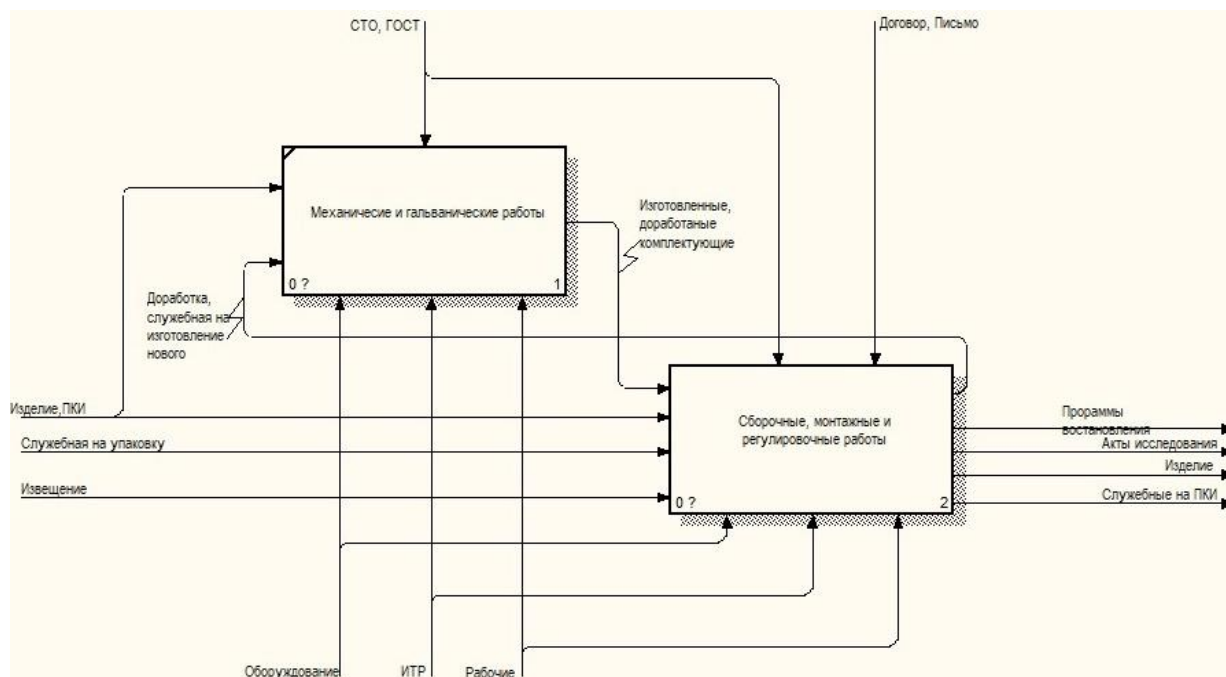


Рис. 2. Функциональная модель блока «Производство»  
Fig. 2. Functional model of the "Production" block

В производстве основная часть работ по анализу, поиску неисправностей и ремонту изделия приходится на сборочно-монтажные цеха. На рис. 3 представлена функциональная модель процессов сервисного обслуживания в монтажно-сборочном цехе.

Процесс сервисного обслуживания можно разбить на три этапа, блок-схемы процедур которых представлены ниже:

- 1) прием и диагностика изделия (рис. 4);
- 2) ремонт изделия (рис. 5);
- 3) оформление и передача изделия заказчику (рис. 6).

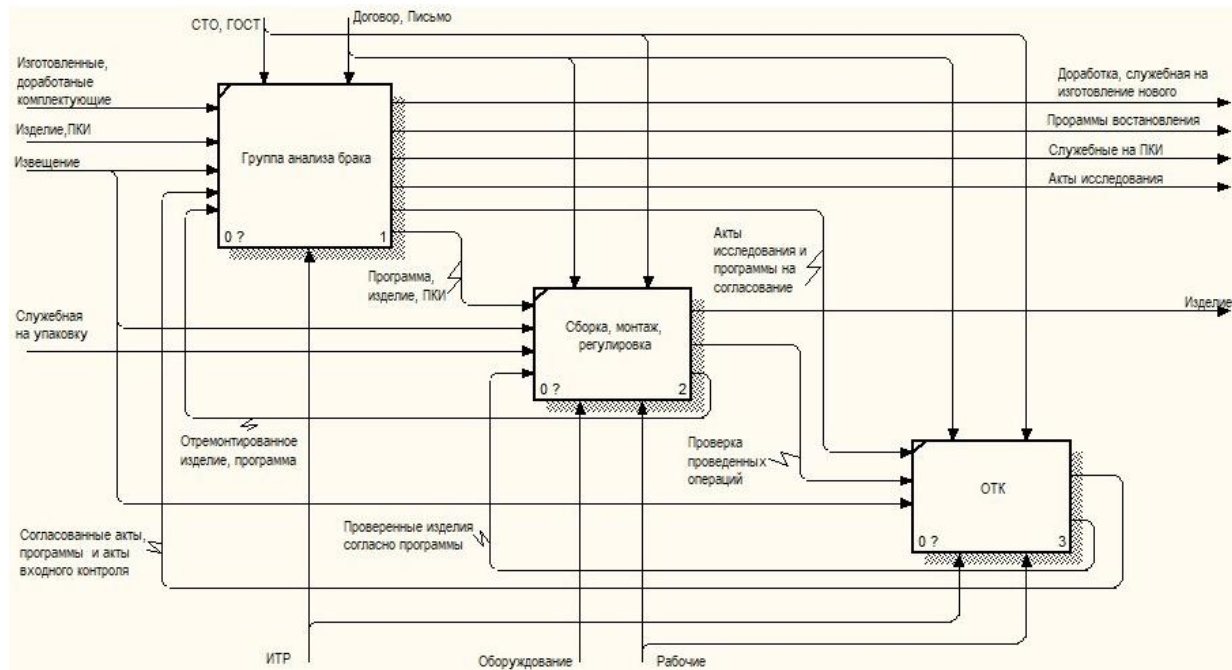


Рис. 3. Функциональная модель процессов сервисного обслуживания в монтажно-сборочном цехе  
Fig. 3. Functional model of service maintenance processes in the assembly shop

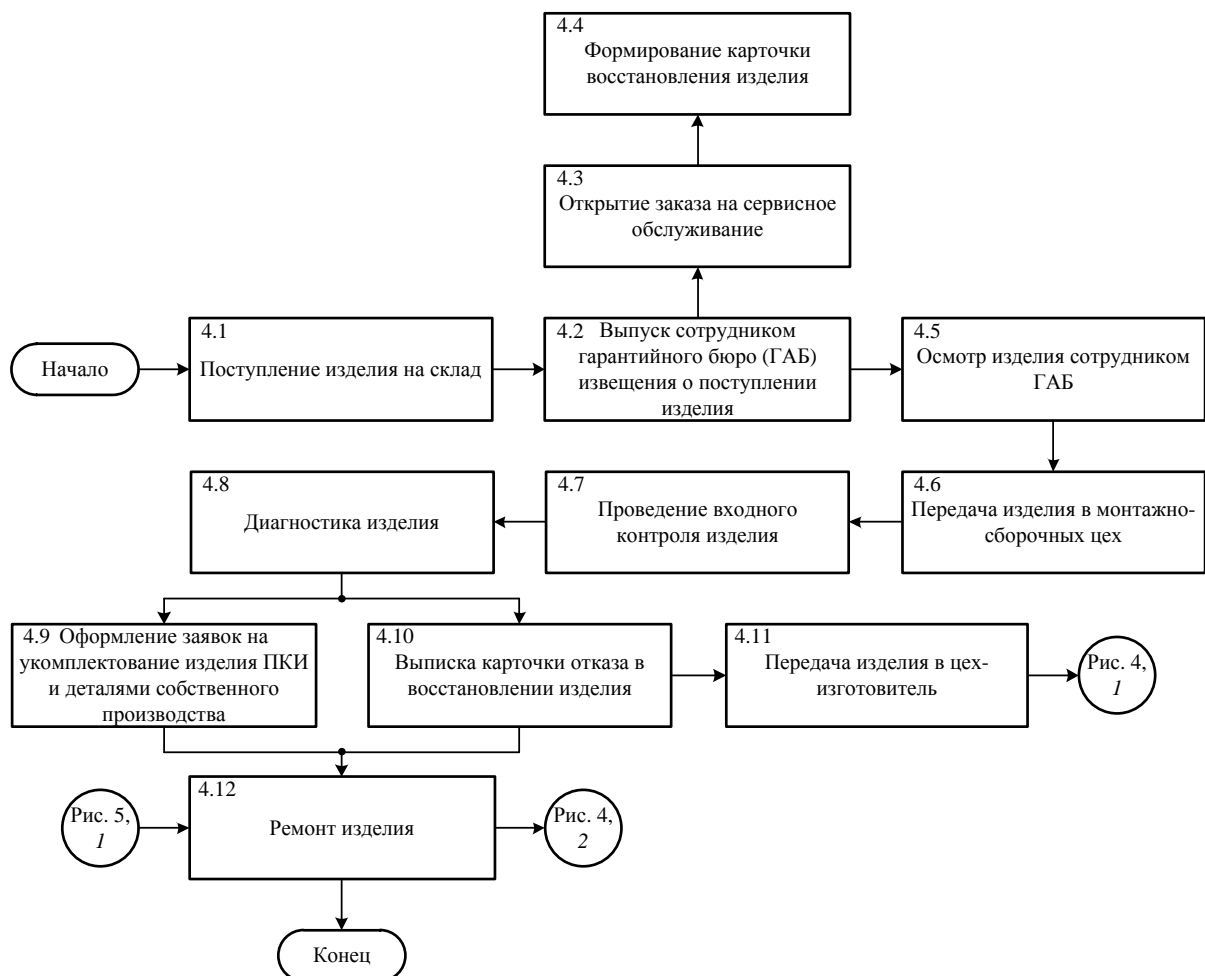


Рис. 4. Блок-схема этапа приема и диагностики изделия  
Fig. 4. Block diagram of the product acceptance and diagnostics stage

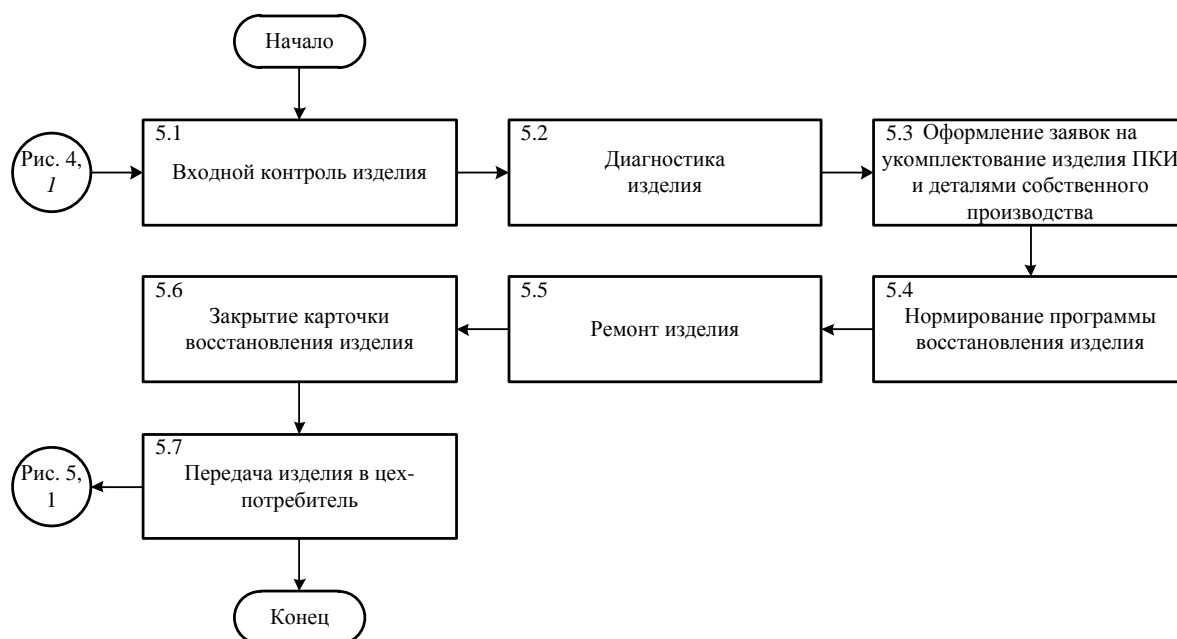


Рис. 5. Блок-схема этапа ремонта изделия  
Fig. 5. Block diagram of the product repair stage

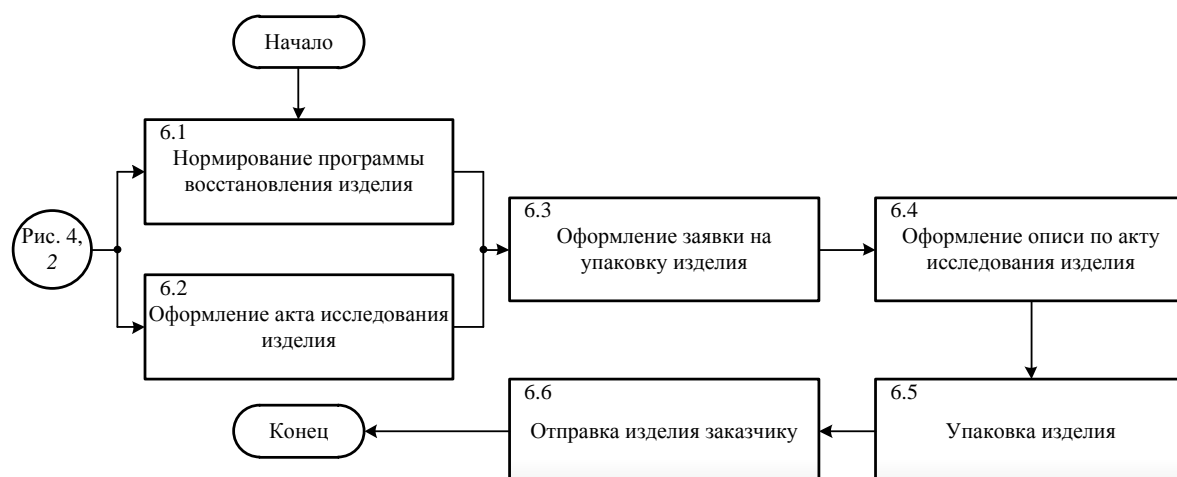


Рис. 6 Блок-схема этапа оформления и передачи изделия заказчику  
Fig. 6 Block diagram of the execution and product transfer stage

Анализ существующей реализации процесса сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры на предприятии НПП «Радиосвязь» показал, что база данных сервисного обслуживания, график восстановления изделий и этапы ремонта изделия не связаны единой средой сервисного обслуживания на предприятии. Также данная ситуация не позволяет автоматизировать процессы ремонта изделий на предприятии в должной степени.

### Реализация системы сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры

В организации деятельности предприятия «НПП «Радиосвязь» важное место занимает гарантийное и послегарантийное обслуживание производимых изделий. Для учета и анализа заявок поступления изделий ведется база данных сервисного обслуживания. Ежемесячно сотрудниками предприятия формируется график восстановления гарантийных изделий по результатам фильтрации и анализа данных сервисного обслуживания. Формирование графика восстановления требует значительных временных затрат на перенос данных, оценку текущего состояния ремонта изделий и сроков восстановления. При этом дополнительно возникают ошибки, связанные с влиянием человеческого фактора, что приводит:

- к увеличению срока восстановления изделий;
- уменьшению прослеживаемости цикла ремонта изделия;
- затратам рабочего времени и конфликтным ситуациям между отдельными подразделениями.

Для решения данных проблем разработана автоматизированная система сервисного обслуживания, обеспечивающая построение, отслеживание и актуализацию графиков восстановления изделий. Главное окно системы сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры организовано в виде таблицы электронного журнала сервисного обслуживания со следующими элементами (рис. 7):

- номер изделия, присвоенный при поступлении на предприятие;
- тип ремонта (гарантийный, негарантийный, постгарантийный);
- номер цеха, в котором будет выполнен ремонт изделия;
- заводской номер изделия;
- номер и статус (гарантийный, общий) заказа на сервисное обслуживание;
- наименование и десятичный номер прибора (блока) изделия, подлежащего ремонту;
- номер извещения о поступлении изделия с описанием дефекта для передачи в цех;
- номер карточки отказа для передачи в цех-изготовитель узла, блока или прибора, входящего в состав ремонтируемого изделия;
- текущее состояние работ по восстановлению изделия;
- прогнозируемая дата восстановления изделия;
- номер акта исследования изделия после проведения ремонта и необходимых проверок характеристик изделия.

#	№	Тип ремонта	Цех	Изделие, зав. №	№ заказа	Прибор/блок	Извещение в цех	№ карточек отказа

Текущее состояние работ	Дата восстановления	Акт исслед.	Примечание

Рис. 7. Главное окно системы сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры  
Fig. 7. Main window of the electronic equipment service system

Также интерфейс системы включает дополнительные элементы:

- элемент управления «С учетом актов исследования», позволяющий убирать из таблицы строки для отремонтированных изделий;
- поля выбора номера цеха, типа ремонта и кнопка формирования графика восстановления изделий;
- кнопка формирования отчетов в форматах текстового или табличного электронных документов.

При нажатии на дополнительную кнопку «Редактирование» открывается форма редактирования заказа на сервисное обслуживание, которая включает следующие активные элементы, доступные пользователю (рис. 8):

- строка «Номера карточек отказа» – вписывается в случае передачи входящих узлов ремонтируемого изделия в цех-изготовитель (данные карточки могут отсутствовать);
- кнопка «Добавить» – позволяет вносить оценочную дату восстановления изделия при сохранении видимости предыдущей даты. История изменения дат восстановления позволяет выделить проблемные изделия и инициировать корректирующие действия в процесс сервисного обслуживания;
- кнопка «Выберите файл» – добавляет файлы следующих электронных документов: «Акт осмотра» (описание состояния изделия), «Программа исследования и восстановления» (описание операций по определению причины дефекта и проведенных во время ремонта с заключением Отдела технического контроля о соответствии), «Акт исследования» (общие сведения об устраненном дефекте, замененных и изготовленных элементах, подтверждающие подписи);
- поле «Текущее состояние работ», ввод сведений о текущей стадии ремонта изделия – заполняется сотрудниками цехов, ответственных за выполнение работ по сервисному обслуживанию данного изделия.

Рис. 8. Активные элементы формы редактирования заказа на сервисное обслуживание

Fig. 8. Active elements of the service order editing form

На рис. 9 дано табличное представление графика восстановления гарантийных изделий. Он формируется после выбора цеха и типа ремонта (см. рис. 7) на главном окне системы сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры функцией формирования графика восстановления изделий.



ГРАФИК					
восстановления гарантийных изделий по 15 цеху на апрель 2024 г.					
Гарантийный					
№	Изделие	Прибор/блок	Извещение в цех	Дата восстан.	Текущее состояние работ
1					

Рис. 9. Общая форма графика восстановления гарантийных изделий  
Fig. 9 General form of the schedule for warranty products restoration

Поля графика восстановления изделий включают:

- порядковый номер изделия в графике восстановления;
- заводской номер изделия;
- наименование и десятичный номер прибора (блока) изделия, подлежащего ремонту;
- номер извещения о поступлении изделия с описанием дефекта для передачи в цех;
- прогнозируемая дата восстановления изделия;
- текущее состояние работ по восстановлению изделия.

В верхней части графика восстановления размещены грифы согласования и утверждения для соответствующих подписей. В заголовке графика восстановления изделий указывается тип ремонта, цех, ответственный за сервисное обслуживание изделий и период времени, для которого сформирован график. Согласно данному графику обеспечивается выполнение сроков восстановления, анализируются данные и принимаются корректировочные решения, также данные графики предоставляются по требованию потребителя.

В совокупности с другими организационно-техническими решениями предлагаемая автоматизированная система сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры позволила увеличить коэффициент восстановления изделий спутниковой навигации и связи на предприятии «НПП «Радиосвязь» с  $V = 0,5$  до  $V = 0,9$  за февраль – апрель 2024 г. Это свидетельствует о повышении эффективности процессов сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры в условиях мелкосерийного производства в целом.

### Заключение

Предложенная автоматизированная система сервисного обслуживания радиоэлектронной аппаратуры в условиях мелкосерийного производства позволяет автоматизировать предоставление информации о текущем состоянии процессов сервисного обслуживания до лиц, принимающих решения, и непосредственного заказчика. Также она обеспечивает автоматизацию текущего сервисного документооборота. Информация о реализации сервисных и ремонтных работ консолидируется в единой базе данных и выводится в удобном формате для проведения аналитических работ и принятия управленческих решений. Предложенная система при постоянном применении на АО «НПП «Радиосвязь» зарекомендовала себя как эффективное средство автоматизации контроля процессов сервисного обслуживания производимых изделий связи и навигации.

### Список литературы

1. Ветров А.С. Сервисное обслуживание продукции машиностроительных предприятий России // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2013. № 1. С. 34–37.
2. Васильева О.Е. Управление качеством сервисного обслуживания промышленной продукции // Экономика и управление. 2010. № 7 (57). С. 64–68.
3. Акимов А.Д. Особенности сервисного обслуживания биотехнологических предприятий в России // Аудиторские ведомости. 2025. № 2. С. 154–159. DOI: 10.24412/1727-8058-2025-2-154-159
4. Вырвич А.А., Дубовская Н.И. Трансформация системы сервисного обслуживания подвижного состава автотранспортного предприятия к условиям цифровой экономики // Актуальные

проблемы защиты и безопасности: тр. XXIII Всерос. науч.-практ. конф. РАРАН. Т. 4. СПб., 2020. С. 96–102.

5. Безверхая Т.В. Применение PLM-систем в процессе сервисного обслуживания изделий приборостроительного предприятия // *Modern Science*. 2019. № 12-1. С. 45–50.

6. Рябович Д.А. Организация предпродажной подготовки и сервисного обслуживания машин на предприятии // Направления развития технического сервиса: материалы национальной студенческой науч.-практ. конф., Екатеринбург, 25 ноября 2021 года. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет, 2021. Вып. 5. С. 75–79.

7. Моисеенко В.В. Оптимизация процесса сервисного обслуживания на промышленных предприятиях // Инженерная экономика и технологическое предпринимательство: технологическое лидерство и стратегия инжинирингового прорыва: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Донецк, 20 февраля 2025 года. Донецк: ДонНТУ, 2025. С. 291–301.

8. Грицкевич О.В., Попп Е.А. Совершенствование планирования сервисного обслуживания основных фондов приборостроительных предприятий // *Инновации и инвестиции*. 2019. № 9. С. 290–294.

9. Галямов Р.А., Мингалева Г.Ф. Управление средствами мониторинга сопутствующих процессов как сервисное обслуживание устройств ИТ-инфраструктуры предприятия // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2022. Т. 78, № 4. С. 80–83.

10. Новикова В.Д., Шишкин П.А. Виды обслуживания в среде сервисного инженерно-технического предприятия // *Форум. Серия: Роль науки и образования в современном информационном обществе*. 2024. № S1-3 (32). С. 103–107.

11. Груздева К.Е., Смирнова Ж.В. Процесс сервисного обслуживания и пути его совершенствования // *Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования*. 2019. № 8 (42). С. 20–27.

12. Glavič P., Pintarič Z.N., Bogataj M. Process Design and Sustainable Development – A European Perspective. *Processes*. 2021. Vol. 9 (1). P. 148. DOI: 10.3390/pr9010148

13. Никитин А.В. Послепродажное обслуживание сложной техники на основе технологий интерактивного погружения // Научная сессия ГУАП: сб. докл. науч. сессии, посвященной Всемирному дню авиации и космонавтики, Санкт-Петербург, 08–12 апреля 2019 года. В 3 ч. Ч. II. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. С. 418–421.

14. Establishment of International After-Sales Service System for Coal Mine Equipment / Z. Yan, J. Liu, K. Zhu et al. // *2020 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG)*. Qingdao, China, 2020. P. 508–511. DOI: 10.1109/ICWCSG50807.2020.00113

15. Щербак Н.В., Пахомова А.И. Сервисное обслуживание потребителей услуг и факторы повышения конкурентоспособности предприятий сервиса // *Современные условия взаимодействия науки и техники: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф.* 2017. Т. 1. С. 189–191.

16. After sales service: key settings for improving profitability and customer satisfaction / C.G.S. Rebelo, M.T. Pereira, J.F.G. Silva et al. // *Procedia Manufacturing*. 2021. Vol. 55. P. 463–470. DOI: 10.1016/j.promfg.2021.10.063

## References

1. Vetrov A.S. The after-sales service of machine-building enterprises' production in Russia. *Vestnik Saratov state socio-economic university*. 2013;(1):34–37. (In Russ.)

2. Vasilyeva O.E. Industrial production service maintenance quality management. *Economics and management = Ekonomika i upravlenie*. 2010;7(57):64–68. (In Russ.)

3. Akimov A.D. Features of servicing biotechnological enterprises in Russia. *Auditorskiye vedomosti = Audit journal*. 2025;(2):154–159. (In Russ.) DOI: 10.24412/1727-8058-2025-2-154-159

4. Vyrvich A.A., Dubovskaya N.I. [Transformation of the service system for the rolling stock of a motor transport enterprise to the conditions of the digital economy]. In: *Current Issues of Defense and Security: Proceedings of the 23rd All-Russian Scientific and Practical Conference of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences. Vol. 4*. St. Petersburg, 2020. P. 96–102. (In Russ.)

5. Bezverkhaya T.V. [Application of PLM systems in the service maintenance process of instrument manufacturing enterprises]. *Modern Science*. 2019;(12-1):45–50. (In Russ.)
6. Ryabovich D.A. Organization of pre-sale preparation and service of cars at the enterprise. In: *Directions for the Development of Technical Services: Proceedings of the National Student Scientific and Practical Conference, Ekaterinburg, November 25, 2021*. Ekaterinburg: Ural State Agrarian University, 2021. Iss. 5. P. 75–79. (In Russ.)
7. Moiseenko V.V. Optimization of the service process at industrial enterprises. In: *Engineering economics and technological entrepreneurship: technological leadership and strategy of engineering breakthrough: Proceedings of the III International scientific and practical conference, Donetsk, February 20, 2025*. Donetsk: DonNTU, 2025. P. 291–301. (In Russ.)
8. Gritskevich O.V., Popp E.A. Improvement of planning of service of fixed assets of instrument making industry enterprises. *Innovacii i investicii*. 2019;(9):290–294. (In Russ.)
9. Galyamov R.A., Mingaleev G.F. Management of monitoring means for auxiliary processes as service maintenance of IT infrastructure devices. *Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolov*. 2022;78(4):80–83. (In Russ.)
10. Novikova V.D., Shishkin P.A. [Types of Maintenance in the Environment of a Service Engineering and Technical Enterprise]. *Forum. Series: The Role of Science and Education in the Modern Information Society*. 2024;S1-3(32):103–107. (In Russ.)
11. Gruzdeva K.E., Smirnova Zh. V. Service process and paths its improvement. *Innovative economy: prospects for development and improvement*. 2019;8(42):20–27. (In Russ.)
12. Glavič P., Pintarič Z.N., Bogataj M. Process Design and Sustainable Development – A European Perspective. *Processes*. 2021;9(1):148. DOI: 10.3390/pr9010148
13. Nikitin A.V. After-sales service of complex technical systems based on interactive and immersive technologies. In: *Scientific Session of GNASA: Proceedings of the Scientific Session Dedicated to the World Aviation and Cosmonautics Day, St. Petersburg, April 8–12, 2019. In 3 parts. Part II*. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Aeronautics and Cosmonautics, 2019. P. 418–421. (In Russ.)
14. Yan Z., Liu J., Zhu K., Yuan Y., Yang W., Ma Y. Establishment of International After-Sales Service System for Coal Mine Equipment. In: *2020 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG)*. Qingdao, China, 2020. P. 508–511. DOI: 10.1109/ICWCSG50807.2020.00113
15. Shcherbakova N.V., Pakhomova A.I. [Service Maintenance of Service Consumers and Factors Improving Enterprise Competitiveness]. In: *Modern Conditions of the Interaction between Science and Technology: Collection of articles from the International scientific and practical conference. Vol. 1*. 2017. P. 189–191. (In Russ.)
16. Rebelo C.G.S., Pereira M.T., Silva J.F.G., Ferreira L.P., Sá J.C., Mota A.M. After-sales Service: Key Settings for Improving Profitability and Customer Satisfaction. *Procedia Manufacturing*. 2021;55:463–470. DOI: 10.1016/j.promfg.2021.10.063

### Информация об авторах

**Капулин Денис Владимирович**, канд. техн. наук, доц., заведующий базовой кафедрой информационных технологий на радиоэлектронном производстве, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; DKapulin@sfu-kras.ru.

**Воронков Максим Сергеевич**, аспирант, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; Mvoronkov-a21@stud.sfu-kras.ru.

**Русских Полина Андреевна**, канд. техн. наук, доц. базовой кафедры информационных технологий на радиоэлектронном производстве, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; Prusskikh@sfu-kras.ru.

**Дрозд Олег Владимирович**, канд. техн. наук, доц. базовой кафедры информационных технологий на радиоэлектронном производстве, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; Odrozdz@sfu-kras.ru.

**Соболева Елена Владимировна**, старший преподаватель кафедры разговорного иностранного языка, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; Esoboleva@sfu-kras.ru.

*Information about the authors*

**Denis V. Kapulin**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Basic Department of Information Technologies in Radioelectronic Production, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; DKapulin@sfu-kras.ru.

**Maksim S. Voronkov**, Postgraduate student of the Basic Department of Information Technologies in Radioelectronic Production, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Mvoronkov-a21@stud.sfu-kras.ru.

**Polina A. Russkikh**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Basic Department of Information Technologies in Radioelectronic Production, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Prusskikh@sfu-kras.ru.

**Oleg V. Drozd**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Basic Department of Information Technologies in Radioelectronic Production, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Odrozd@sfu-kras.ru.

**Elena V. Soboleva**, Senior Lecturer of the Department of Conversational Foreign Language, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Esoboleva@sfu-kras.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 04.03.2025**

**The article was submitted 04.03.2025**

## ЭВОЛЮЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РАЗРАБОТКЕ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

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

**М.В. Ядрышникова**, [reeyardma@gmail.com](mailto:reeyardma@gmail.com)

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

**С.А. Лазарева**, [lazarevas124@gmail.com](mailto:lazarevas124@gmail.com)

**В.М. Губин**, [teacfoou@gmail.com](mailto:teacfoou@gmail.com)

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** В настоящее время применение больших языковых моделей (large language model, далее – LLM) в корпоративных информационных системах и системах поддержки принятия решений становится все более распространенной практикой. **Цель исследования:** рассмотреть последовательное развитие технологий, использующихся в корпоративных информационных системах, от математических моделей до нейронных сетей, включая большие языковые модели, а также выдвинуть рекомендации по применению LLM в корпоративных системах и предположить, каковы будущие тенденции и риски применения алгоритмов искусственного интеллекта в таких системах. **Методы и материалы.** Исследование основано на ретроспективном анализе алгоритмов искусственного интеллекта. Рассмотрено несколько вариантов использования больших языковых моделей в корпоративных системах и системах поддержки принятия решений и проведен их сравнительный анализ по ряду критериев, выявленных на основе изученных существующих исследований. **Результаты.** Приведено несколько рекомендаций лучших практик по применению рассмотренных подходов к применению LLM в корпоративных системах. Также описаны преимущества и недостатки нового подхода к разработке программного обеспечения с применением LLM, где человек выступает в роли архитектора и планировщика задач, а LLM – в роли их исполнителя. Рассмотрены передовые технологии, ядром которых являются большие языковые модели – агентный искусственный интеллект, позволяющий моделям взаимодействовать со внешним миром посредством инструментов и выполнять разноплановые задачи подобно человеку. Приведены предположения о будущих тенденциях в применении искусственного интеллекта в целом и LLM в частности в корпоративных информационных системах и системах поддержки принятия решений и рисках, связанных с дальнейшим развитием этих технологий. **Заключение.** Полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для принятия решений управленцами в отношении целесообразности применения рассмотренных в статье методов и связанных с ними рисков при построении корпоративных информационных систем.

**Ключевые слова:** поддержка принятия решений, корпоративные информационные системы, машинное обучение, искусственный интеллект, большие языковые модели, агентные системы, вайб-кодинг

**Для цитирования:** 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

## EVOLUTION OF USAGE AND APPLICATION OF MACHINE LEARNING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DEVELOPMENT OF ENTERPRISE INFORMATION SYSTEMS AND IN DECISION SUPPORT SYSTEMS

**A.A. Shinkarev**, *sania.kill@mail.ru*

**M.V. Yadryshnikova**, *reeyardma@gmail.com*

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

**S.A. Lazareva**, *lazarevas124@gmail.com*

**V.M. Gubin**, *teacfoou@gmail.com*

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

**Abstract.** Usage of large language models (LLMs) in enterprise information systems has been growing more common in recent years. **The purpose of the study** is to consider the evolution of technologies used in enterprise information systems from mathematical models to neural networks, including large language models, as well as suggest recommendations on the application of LLMs in enterprise systems and assume future tendencies and risks of using artificial intelligence (AI) in such systems. **Methods and materials.** A retrospective method was used to analyze the development of artificial intelligence algorithms. Several approaches to using LLMs in enterprise systems and decision support systems were considered and compared by several criteria identified based on the existing studies. **Results.** The conducted study includes several recommendations on the best practices of applying LLM-based approaches to enterprise systems. It also covers the advantages and disadvantages of a new LLM-based programming approach, where a person acts as a system architect, while a model performs the technical tasks. The study describes the most recent advanced technology, agentic AI, which allows large language models to interact with their external environments and perform diverse tasks using various tools. The study also includes assumptions about future tendencies of AI usage in enterprise information systems and the corresponding risks. **Conclusion.** The results of this study can be used as a base for managers' decision making regarding the feasibility of using LLM-based methods considered in the study and their corresponding risks when building enterprise information systems.

**Keywords:** decision support, enterprise information systems, machine learning, artificial intelligence, large language models, agent-based systems, vibe coding

**For citation:** 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

### Введение

В современном мире востребованным как никогда становится умение перестроиться под радикально меняющийся информационный ландшафт. Еще буквально вчера индустрия корпоративных информационных систем была одержима цифровыми двойниками, большими данными и цифровой трансформацией, а уже сегодня мир втягивается в новую гонку – гонку искусственного интеллекта. И этот искусственный интеллект пронзает все сферы человеческой жизни, становясь незаменимым помощником в принятии повседневных и рабочих решений.

При этом он же создает риски для человечества, становясь опасным конкурентом на рынке труда. А разработчики программного обеспечения в общем и инженеры машинного обучения в частности лишь приближают увлекательное, но для многих и пугающее будущее. Будущее, где человек должен освободиться от рутины монотонной работы и заняться более интересными, креативными и высокоуровневыми задачами. Однако не ясно, насколько радужными окажутся эти перспективы и насколько глубокой – выкопанная самим себе яма. Ведь креативной работы на всех может и не хватить, а искусственный интеллект со временем вполне сможет взять на себя и креатив.

Креативной и творческой деятельностью можно считать и сам процесс разработки программного обеспечения, а не только верхнеуровневое принятие управленческих решений. Споры о том, является программирование творчеством или ремеслом, не утихают, а теперь разгораются вновь с приходом агентного искусственного интеллекта. Но сегодня вопрос заключается уже не в том, творчество ли это, а в том, когда и какую часть труда разработчиков, тестировщиков, дизайнеров и других направлений в ИТ заменит искусственный интеллект. Результаты, которые показывают такие экстремальные подходы к разработке программных систем, как вайб-кодинг, подчас ошеломляют, создание прототипов систем и пилотных версий приложений становится доступно каждому, у кого есть продуктовая идея для стартапа, и занимает часы труда этого человека, у которого может и не быть специализированного инженерного образования. Эта пьянящая простота таит в себе большую опасность взрывного, неконтролируемого роста сложности поддержки системы, разработанной искусственным интеллектом, а также проблем с безопасностью и сложностью поиска и исправления ошибок в бизнес-логике. Как и в диалектике, где присутствует тезис – переход к быстрому программированию роботом без человека, антитезис – риски низкого качества, проблем с безопасностью, быстрого роста сложности неприемлемы и синтезис – поиск баланса между тем, к чему мы привыкли и тем, к чему стремится вся индустрия информационных технологий.

Прежде чем рассматривать изменения в процессе разработки программного обеспечения, начнем с более детального изучения развития информационных систем поддержки принятия решений в разрезе развития их технологического базиса, начиная от первых систем и заканчивая агентным искусственным интеллектом.

### **1. Системы поддержки принятия решений**

Принятие решений – процесс идентификации альтернатив и выбора среди них подходящего исходя из ценностей и предпочтений принимающего решение, причем зачастую необходимо делать выбор в условиях неопределенности. Современному управленцу приходится регулярно сталкиваться с необходимостью анализа сложных ситуаций, в которых когнитивные искажения лица, принимающего решения, могут снижать качество выбора, особенно в условиях ограниченности времени, стрессовых ситуаций и большого объема разнородной информации.

В такой распространенной ситуации кстати приходятся системы поддержки принятия решения (Decision Support Systems, далее – DSS). DSS – это особый класс компьютеризированных информационных систем, направленный на содействие в принятии решений, чаще всего в рамках организаций. DSS предназначена для того, чтобы помочь лицам, принимающим решения, агрегировать полезную информацию из сырых необработанных данных, бизнес-моделей компании и даже из личного опыта руководителя, что в совокупности позволяет эффективнее выявлять и решать проблемы и принимать правильные решения [1].

Использование DSS в корпоративной среде, где ошибочное решение может привести к серьезным финансовым и репутационным потерям для целой организации, позволяет снизить риски, связанные с неопределенностью, за счет моделирования ситуаций, а также благодаря выявлению скрытых, но существенных для бизнеса связей, существующих между событиями и ключевыми метриками предприятия. DSS повышают адаптивность организаций к изменяющимся условиям ведения бизнеса и усиливают стратегическую устойчивость за счет дополнения (Augmentation) возможностей человека впечатляющим потенциалом современных информационных технологий и вычислительных мощностей. Для российских реалий ведения бизнеса в целом и принятия управленческих решений в частности характерен стиль ручного единоличного управления, при котором часто недостает подкрепления интуитивных решений руководителя и их обоснования. Внедрение современных и перспективных систем принятия решений позволит подступиться к решению этой проблемы, при этом не обременяя руководителя неудобным и неполноценным инструментом, а предоставляя ему мощный, нетребовательный к однородности данных инструмент анализа и поддержки принятия решений.

Основной фокус исследований в этой сфере – повышение эффективности как процесса принятия решений руководителем, так и самих решений. Изначально главная роль DSS заключалась в предоставлении пользователю сводной информации на основе статистики, собираемой из внутренней корпоративной базы данных. Алгоритмы, использовавшиеся в данных системах, не были



гибкими и, как правило, ограничивались четко заданными правилами и условиями. Такие DSS можно было использовать для формирования отчетности, статического анализа и простых решений с четко заданными условиями «если-то». По мере увеличения гибкости применяемых алгоритмов и совершенствования аналитических возможностей систем расширялись их прогностические способности, что позволяло решать более сложные задачи по моделированию, например, комплексное планирование производства и поставок. С добавлением интеграции внешних данных появилась возможность анализировать рынок, проводить онлайн-мониторинг и конкурентную разведку и учитывать полученные данные при принятии решений. С началом использования технологий машинного обучения объем задач, связанных с прогнозированием, аналитикой большого объема данных и их классификацией, значительно увеличился, а также стала возможной работа DSS в масштабе времени, близкого к реальному. Современные системы, использующие то, что сегодня называется искусственным интеллектом, способны рекомендовать стратегии дальнейшего развития на основе смоделированного поведения рынков, а в некоторых случаях – принимать решения автоматически.

Системы поддержки принятия решений стали неотъемлемым инструментом для многих компаний при построении стратегий, аналитики, планировании и в других управленческих процессах, поскольку успешное их внедрение позволяет организации минимизировать риски, своевременно находить новые точки роста в условиях быстро изменяющегося рынка. На текущий момент DSS продолжают активно развиваться в области машинного обучения и искусственного интеллекта. Однако такой рост обуславливает появление новых требований к компаниям: для сохранения конкурентоспособности необходимо оперативно, но при этом своевременно и разборчиво внедрять постоянно обновляющиеся технологии в архитектуру корпоративных информационных систем, корректировать организационные процессы и обучать персонал эффективному взаимодействию с информационными системами. При этом все чаще возникают вопросы о степени интеграции и применимости DSS, их самостоятельности и автономности в принятии решений, границах ответственности за принятые решения, глубине и характере влияния DSS на организационные структуры, корпоративную культуру и саму природу управленческих процессов. Для лучшего понимания места современных подходов к построению систем поддержки принятия решений рассмотрим в исторической ретроспективе развитие технологической и научной базы, на основе которой построены такие системы.

### ***1.1. Первые системы поддержки принятия решений***

Первые системы поддержки принятия решений появились в середине XX века и в основном относились к модельно-ориентированным системам поддержки принятия решений (Model-Oriented DSS) – системам, основанным на взаимодействии пользователя с различного рода моделями (финансовыми, статистическими, имитационными и пр.) [2]. Одним из ключевых подходов, применявшихся на этом этапе, было динамическое программирование (Dynamic Programming, далее – DP), предложенное Ричардом Беллманом в 1950-х [1]. Суть метода заключалась в разбиении крупной задачи на подзадачи и последовательном решении каждой из них с запоминанием промежуточных результатов – такая техника называлась мемоизацией (Memoization). На каждом этапе вычислялся наиболее оптимальный вариант следующего шага и запоминался. Динамическое программирование применялось в маршрутизации транспорта, управлении запасами, планировании производства и других подобных задачах оптимизации. Однако данный подход требовал четко формализованной логики и структуры задачи и построения заранее известной модели среды, в которой он будет применен. Система не выявляла скрытые закономерности: она лишь вычисляла оптимальную последовательность действий в рамках строго заданных правил и параметров на основе уже прописанных связей. Поэтому метод позволял распределять известное количество ресурсов по известным критериям, но был неспособен предсказать появление новых критериев или изменение существующих. Например, в задаче маршрутизации система на основе динамического программирования смогла бы учесть влияние пробок на стоимость маршрута только при наличии заранее прописанной функции, связывающей интенсивность пробок со стоимостью маршрута. Система не знает, с какой вероятностью пробка возникает на этом маршруте, и если из-за аварии дорожная ситуация изменится на пути, для которого зависимость от интенсивности пробок не задана, то система может выбрать в качестве оптимального маршрута тот, который



далеко не является таковым на данный момент. При этом критерии требуется настраивать вручную, то есть если управляющий системой не знает однозначно, какая конкретно взаимосвязь между пробками и стоимостью маршрута, система не сможет выявить эту зависимость самостоятельно.

После закрепления методов модельно-ориентированного программирования в 1970–1980-х годах в поддержке принятия решений начали применять экспертные системы (Knowledge-Based Systems), которые использовали знания и правила (например, в формате «если-то») для анализа данных и предоставления рекомендаций и выводов. В отличие от модельно-ориентированных систем, оперировавших количественными параметрами, экспертные системы могли работать с критериями качественного и описательного характера, например, «тяжелое состояние» вместо более конкретного «температура 38,9». Это позволило применять данный подход в более слабо-структурированных задачах, то есть тех, для которых построить математическую модель сложно или даже практически невозможно. В качестве ответа экспертные системы предоставляли логический вывод или рекомендацию, имитируя оценку эксперта-человека. Благодаря этому данный вид систем применялся в медицине и диагностике, например, на нем в 1972 году была основана MYCIN [3] – медицинская система, использовавшая логические правила для рекомендаций по антибиотикам. Главным недостатком экспертных систем была проблема масштабируемости и поддержки в актуальном состоянии базы данных и правил, на основе которых осуществлялся поиск решения.

Следующим этапом развития DSS в 1980-х годах стали системы, управляемые данными (Data-Driven DSS), в которых основой работы стало взаимодействие с данными, накопленными компанией (как правило, представленными в виде временных рядов), а также данных извне, то есть произведенных не в рамках деятельности компании, а, например, описывающих ситуацию в мире [2]. Если ранее основой систем были математические модели или правила, а данные представлялись лишь как переменные на вход, то, применяя подход, основанный на управлении данными, главным элементом стали именно они, а аналитические методы, применяемые к данным для выявления закономерностей, стали второстепенными. Ведь если данные есть, то они могут быть использованы любыми алгоритмами и системами отчетов для того, чтобы ответить на вопросы бизнеса сегодня. Важно, что ориентация на сбор всевозможных данных предоставляет возможность в будущем ответить на те вопросы, которые сегодня не удастся предсказать. Наличие новых инструментов при отсутствии исторических данных во многих случаях делает их бесполезными.

Смещение фокуса на данные стало возможным, во-первых, благодаря распространению систем планирования ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning, далее – ERP) и управления взаимоотношениями с клиентами (Customer Resource Management, далее – CRM) в корпоративной среде, что увеличило накапливаемый компаниями объем данных, которые можно было использовать для помощи в принятии решений. Во-вторых, толчком к этому качественному переходу послужило активное развитие реляционных СУБД (систем управления базами данных) в 1970-х годах [4] и особенно выход Oracle [5] в 1979 году – первой коммерческой реляционной СУБД. Такой переход, обусловленный технической революцией, будет нам встречаться и в дальнейшем, ведь принципиально новая технологическая база открывает новые, ранее невиданные перспективы.

Гибкость и применимость систем, управляемых данными, стала значительно выше использовавшихся ранее DSS, ориентированных на модели и правила, поскольку пользователь мог варьировать и критерии анализа, и срезы данных, к которым он их применял. В качестве аналитических инструментов использовались различные методы агрегирования и статистики, а также технология интерактивной аналитической обработки данных (Online Analytical Processing, далее – OLAP). OLAP – технология высокоскоростного многомерного анализа больших объемов данных [6]. В данном случае многомерность данных означает возможность формирования среза данных по различным категориям и, соответственно, рассмотрение их по разным показателям. OLAP позволяет выполнять практически любые запросы к данным и всем их комбинациям, при этом работая с историческими данными, объем которых исчисляется терабайтами и даже петабайтами, в режимах массового импорта и обработки потоковых событий [7]. OLAP, однако, не позволял автоматически выявлять закономерности в данных, поэтому с его помощью DSS не могли предска-

вать на основе анализируемых данных дальнейшие тенденции. Предиктивные возможности систем поддержки принятия решений начали расширяться с появлением и развитием методов глубинного анализа данных (Data Mining) [8] – поиска и извлечения закономерностей из большого объема данных. Впоследствии концепция глубинного анализа данных и его использование в информационных системах послужили мостом для интеграции технологий искусственного интеллекта в корпоративную среду.

### ***1.2. Начало применения искусственного интеллекта в системах поддержки принятия решений***

В 1990-е годы накопленные, отработанные и уже стандартизированные подходы хранения, обработки и анализа данных объединились в концепцию бизнес-интеллекта (Business Intelligence, далее – BI) – набора технологических процессов для сбора, управления и анализа данных организации с целью получения информации, способной помочь в принятии решений касательно стратегии и операционной деятельности компании [9]. Первоначально основными функциями BI были обработка, хранение и визуализация корпоративных данных, но он был ограничен ретроспективным взглядом на бизнес-процессы, что не позволяло предсказывать последующие тенденции. То есть можно было с разных точек зрения увидеть и проанализировать, как выстраивалась деятельность организации до текущего момента, но на основе этого анализа не выявлялись закономерности, на которые можно было бы опираться при планировании будущей деятельности. На этом этапе и возникла потребность в интеграции глубинного анализа данных, основная часть алгоритмов которого на тот момент основывалась на статистике и логике. В глубинном анализе впервые применялись алгоритмы машинного обучения (Machine Learning, далее – ML), такие как деревья решений, метод поиска ближайших соседей и нейронные сети, но пока что они использовались только в комбинации с традиционной аналитикой, причем преобладала именно последняя.

В середине 1990-х в связи с постоянным увеличением объемов цифровых данных потребность в новом поколении инструментов для извлечения ценной информации из этих данных становилась все острее [10]. При этом обработка таких объемов наконец становилась возможной в связи с увеличением вычислительных мощностей устройств. В то же время активно развивалось машинное обучение: появились метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) и ансамблевые методы – бэггинг (Bagging), бустинг (Boosting), метод случайных лесов (Random Forest), – применение которых значительно повлияло на рост точности используемых ML-решений. Машинное обучение показывало все большую эффективность в бизнес-задачах и постепенно его алгоритмы стали основой глубинного анализа данных, вытесняя статистические методы и реализуя идею предиктивной аналитики внутри систем бизнес-интеллекта [11].

Теперь BI-системы могли решать задачи прогнозирования спроса, сегментации клиентов (т. е. предсказания принадлежности клиента к категории на основе некоторых критериев), оценивать риски и пр. – помощь бизнес-интеллекта в принятии решений в корпоративной среде становилась все эффективнее. Если на этапе зарождения концепции BI бизнес-интеллект и системы поддержки принятия решений разделяли, относя первое в большей степени к информационным системам, то на этом этапе, к началу 2000-х годов, BI-платформы уже помогали выявлять скрытые закономерности и предлагать варианты действий и стратегии на будущее на основе имеющихся данных, а не только представлять и визуализировать их для отчетности, что сделало границу между этими двумя видами систем практически незаметной [12].

## **2. Развитие алгоритмов искусственного интеллекта**

Машинное обучение, ставшее ядром глубинного анализа данных и, как следствие, двигателем предиктивных возможностей бизнес-интеллекта, закрепилось как инструмент аналитики в корпоративном мире, что обозначило последующее внедрение различных отраслей искусственного интеллекта как ключевую точку роста для дальнейшего развития систем принятия решений, управляемых данными, которые на тот момент уже показали и доказали свою ценность для бизнеса [13]. Рассмотрим детальнее развитие одного из видов алгоритмов искусственного интеллекта – нейронных сетей, которые во многом определяют машинное обучение сегодня.

### **2.1. Появление и развитие нейронных сетей**

Нейронные сети, являющиеся видом алгоритмов машинного обучения, способны выучивать нелинейные закономерности во входных данных. Первые попытки применения нейронных сетей в корпоративной среде относятся к 90-м годам XX века, когда алгоритмы машинного обучения начали использоваться в ВІ-системах. Появление метода обратного распространения ошибки в районе 1986 года послужило стартом активного использования нейронных сетей в коммерческих задачах, поскольку данный метод позволял кодировать во внутренних слоях нейронной сети признаки, релевантные доменной области решаемой задачи, и описывать закономерности во входных данных в связях между слоями, что было недоступно при использовании более ранних методов обучения, таких как метод коррекции ошибки [14]. На тот момент в сравнении с настоящим временем возможности вычислительной техники были ограничены [15], а также присутствовал дефицит цифровых данных для обучения, ограничивающий применение нейронных сетей [16]. Ввиду этих факторов первые попытки применения нейронных сетей имели экспериментальный характер. Одной из первых сфер, нашедшей применение нейронных сетей, стал финансовый сектор, где использовались многослойные перцептроны, представляющие собой полносвязные нейронные сети, для задачи оценки кредитных рисков [17]. Появление к концу XX века сверточных нейронных сетей позволило автоматизировать распознавание рукописных символов в банковских чеках, однако потенциал внедрения подобных систем по-прежнему был ограничен дефицитом как данных для обучения, так и вычислительных мощностей [16].

В XXI веке применение нейронных сетей в корпоративной среде стало шире. Одной из основных причин их распространения помимо роста объема данных, доступных для обучения, стало увеличение возможностей вычислительных устройств, в первую очередь за счет применения графических процессоров [18]. В финансовом секторе нейронные сети стали основой систем мониторинга мошеннических транзакций [19], в розничной торговле и электронной коммерции появились нейросетевые системы прогнозирования спроса на товары [20], оптимизации ценообразования [21] и создания персонализированных рекомендаций товаров и услуг [22].

Кроме того, в XXI веке шло активное развитие моделей для обработки естественного языка (Natural Language Processing, далее – NLP) [23, 24]. Основными задачами, решаемыми при помощи нейронных сетей, были анализ эмоционального тона отзывов клиентов, классификация и маршрутизация обращений в службах поддержки, и зачастую лучшее решение каждой из задач предполагало уникальную, специфическую для типа задачи архитектуру нейронной сети. Эти архитектуры в основном представляли собой совмещение сверточных и рекуррентных слоев. Однако, несмотря на активное применение, у всех использовавшихся моделей присутствовало архитектурное ограничение, заключающееся в том, что они слабо улавливали семантические зависимости в тексте и не обладали способностью к глубокому пониманию контекста, не имели когнитивных способностей. Поиск новых архитектур, устраняющих эти недостатки, привел к появлению архитектуры трансформера в 2017 году [25]. Это событие обозначило начало новой эры в развитии искусственного интеллекта.

### **2.2. Появление архитектуры трансформера**

Архитектура трансформера, представленная для решения задачи машинного перевода в 2017 году [25], имела два основных преимущества перед предшественниками. Первое и основное заключается в способности строить взаимосвязи между каждой парой элементов во всей входной последовательности. Значение, определяющее взаимосвязь между двумя элементами входной последовательности, называется оценкой внимания.

Вторым преимуществом трансформера является возможность параллелизации его обучения, так как оценки внимания можно вычислять для каждой пары элементов входной последовательности независимо. Параллелизации обучения нельзя было достичь, используя рекуррентные архитектуры, поскольку в них обработка входной последовательности происходит пошагово. Это позволяет обучать трансформер со схожим числом параметров быстрее рекуррентной сети, действуя при этом больше вычислительных мощностей.

В 2019 году был представлен BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) [26] – модель, унаследовавшая архитектуру трансформера, предобученная для глубокого семантического представления текста и показавшая лучшие на тот момент метрики качества на широ-

ком круге задач. Преимущество модели в том, что она может быть адаптирована под задачи обработки естественного языка путем добавления всего одного дополнительного слоя.

Идеи BERT развивались научным сообществом, появлялись более совершенные варианты архитектуры [27, 28], имеющие повышенные способности к глубокому семантическому пониманию языка. В корпоративных системах модели, имеющие архитектуру, основанную на BERT, активно применялись для задачи распознавания намерений пользователя в диалогах чат-ботов, коррекции ошибок правописания [29], предсказания банкротства [30]. Стоит отметить, что в силу квадратичной сложности механизма внимания и ограничений по памяти графических ускорителей число параметров в данных моделях чаще всего составляло до одного миллиарда, в то время как число параметров в современных крупнейших языковых моделях превышает триллион.

Модели семейства BERT решают задачи маскированного языкового моделирования (Masked Language Modeling, далее – MLM) и задачи оценки взаимосвязи между двумя предложениями (Next Sentence Prediction, далее – NSP). Задача MLM заключается в предсказании корректного токена (Token) для заданной позиции во входной последовательности. В качестве примера задачи в такой постановке, приравнивая для наглядности токен к целому слову, можно привести предложение «Катится колобок по дороге, а навстречу (пропуск) заяц» – модель учится предсказывать, какое слово должно стоять на месте пропуска. Задача NSP заключается в предсказании по двум подряд идущим последовательностям, являются ли они семантически связанными, либо не являются. Иными словами, могли ли в исходном тексте две последовательности идти друг за другом. Допустим, предложения «Катится колобок по дороге» и «А навстречу ему заяц» могут быть связаны по смыслу и быть написанными друг за другом, в то время как предложения «Я тебя съем» и «А навстречу ему заяц» – нет.

При решении задачи MLM модели семейства BERT вычисляют оценки внимания для всех элементов входной последовательности, находящихся до и после целевого элемента, это обуславливает двунаправленность данных моделей. Параллельно с таким подходом к решению задач MLM развивался альтернативный, характеризующийся вычислением оценок внимания только для элементов, находящихся перед целевым. Данный подход реализован в архитектуре генеративного предобученного трансформера (Generative Pre-trained Transformer) и называется задачей предсказания следующего токена (Next Token Prediction, далее – NTP) [31]. Модели, решающие задачу NTP, оказались более способными к генерации текста. Масштабирование вычислительных мощностей, объема обучающих данных и числа параметров в таких моделях привело к появлению в 2019 году моделей, способных генерировать текст, неотличимый от человеческого [32, 33]. На сегодняшний день данный класс моделей называется большими языковыми моделями (Large Language Models, далее – LLM).

### **3. Современные варианты реализации систем поддержки принятия решений в корпоративной среде**

Появление и развитие архитектуры трансформеров, ставшее ключевой точкой в эволюции качества языковых моделей, повлекло за собой широкое внедрение LLM в корпоративную среду. Стоит упомянуть, что в данной статье не рассматривается реализация программных систем с применением LLM, доступных как сервис, то есть так называемых SaaS-решений (Software as a Service), к которым, например, относится ChatGPT. Везде в дальнейшем по умолчанию речь идет о LLM, развернутых самостоятельно в закрытом или контролируемом сетевом контуре, только такой вариант может гарантировать отсутствие утечки конфиденциальных сведений. Однако при возможности и желании все подходы, описанные в статье, применимы и с SaaS-решениями.

На сегодняшний день существует несколько вариантов того, как именно организация будет интегрировать LLM в свои процессы принятия решений и разнообразные более низкоуровневые рабочие процессы, которые в общем виде тоже можно считать процессами принятия решений.

#### **3.1. Большие языковые модели**

Первый подход – использование базовых, предобученных LLM, то есть моделей, обученных на огромных наборах данных, включающих разные сферы, языки, лексику различной специфики и прочую вариативность. Такой подход начали использовать в бизнесе в 2020 году с выходом GPT-3

от OpenAI. Модели в этом случае применяются для генерации контента, а также в работе с текстом, в основном оказывая значимое влияние на процессы взаимодействия компаний с клиентами.

LLM способны анализировать большие объемы данных, например, отзывы клиентов, выявляя их отношение к продукту и определяя потенциальные точки роста, а также подводить итоги по отчетам существующих проектов компании и предлагать на этой основе варианты стратегий последующего развития [34]. Результаты такого анализа помогают руководству принимать решения по дальнейшей работе: какие проекты стоит приоритизировать, какие – остановить, кто составляет основную аудиторию продукта, соответствует ли она целевой, и это только примеры с поверхности, на практике их куда больше.

Генеративные возможности LLM используются в планировании: модели способны создавать индивидуальные расписания проектов, используя условия по времени, бюджету, количеству участников и прочие инструкции, которые пользователи моделей могут задавать в промтах – текстовых запросах, в которых ставятся задачи для моделей [34]. Генерация также применяется бизнесами в написании информационных и рекламных публикаций для социальных сетей, составлении описаний продуктов и других задачах, имеющих отношение к копирайтингу.

Аналитика и генерация часто работают в комбинации. Сначала через промты модель получает информацию о деятельности компании, ее текущих проектах, о том, какую аудиторию она стремится сформировать и какую привлекает на данный момент. Все эти данные модель подытоживает, извлекая ключевые моменты, и учитывая этот контекст, может более качественно работать над планированием проектов и написанием текстов, придерживаясь текущих приоритетов и сохраняя фирменный стиль организации либо корректируя их в соответствии с заданными в промте целями компании.

LLM достигли впечатляющей связности и естественности речи в своих ответах, однако в своем базовом варианте их способность к работе, адаптированной под нужды конкретного пользователя или организации, ограничена [35]. Широкий спектр данных, на которых обучаются эти модели, ведет к их склонности давать слишком обобщенные ответы.

Для персонализации ответов моделей требуется уделять большее внимание промтам и тем корпоративным данным, которые отправляются модели на вход. Даже небольшое изменение промта может значительно повлиять на генерируемый моделью ответ [35]. Это повышает порог входа для сотрудников организации, которые хотели бы воспользоваться системой для взаимодействия с корпоративной базой знаний: им нужно правильно сформулировать запрос при неполной уверенности в том, что именно они ищут. А в контексте систем CRM-формата чата поддержки с ответами на вопросы необходимость точного промта создает еще больше неудобств: вопрос клиента вряд ли будет представлять собой достаточно точный для модели контекст, содержащий всю нужную информацию. По мере развития LLM и укрепления их в индустрии как инструмента корпоративной среды вопрос улучшения качества персонализации ответов стал одним из наиболее актуальных.

Кроме того, базовые LLM наиболее склонны к «галлюцинациям» среди всех основанных на LLM подходах. Галлюцинациями называется феномен генерации правдоподобного и связного текста, по существу являющегося фактически неверным, бессмысленным или не соответствующим контексту [36, 37]. Это явление считается одним из главных недостатков LLM, и борьба с галлюцинациями моделей является одним из самых актуальных направлений исследования. Ведь при применении моделей в бизнесе и ежедневной работе неверный или даже заведомо ложный, но связный на вид, совет может серьезно навредить результатам и тем самым поставить под сомнение целесообразность использования таких «советчиков». Сегодня, чтобы отловить ложные сведения от LLM, необходимо быть экспертом в области, в которой советуемся с ней, а это не всегда возможно. Например, отдав на суммаризацию документ с техническим заданием на разработку сайта объемом 150 страниц, можно получить совершенно бредовые тезисы, про требования к языку программирования C++, о котором в исходном документе нет ни слова. До сих пор нет надежных инструментов верификации подлинности ответов LLM, эти риски сейчас каждый берет на себя и должен их как минимум осознавать и учитывать.

Варианты реализации систем поддержки принятия решений, рассматриваемые далее, построены на основе LLM и разработаны с целью исправления недостатков базовых больших языковых моделей с основным фокусом на улучшение персонализации их ответов.

### 3.2. Дообученные большие языковые модели

Тонкая настройка, или дообучение (Fine-Tuning), – процесс изменения параметров модели с целью достижения большего соответствия ее ответов конкретной задаче или предметной области. Цель такого подхода в том, чтобы дать модели больше дополнительных данных, чем может поместиться в промт, и дать ей возможность не просто получать доступ к данным, а извлекать из них новые паттерны и запоминать их без потери ранее полученных знаний [34]. Тонкая настройка полагается на предобученные модели, предоставляющие основную базу знаний, которая в ходе дообучения корректируется под конкретные сценарии использования. В отличие от предобучения, тонкая настройка часто использует более конфиденциальные данные, поскольку проводится на данных определенной организации, а также в зависимости от целей дообучения и доступных ресурсов применяет специфические подходы для оптимизации скорости и снижения стоимости процесса: от полного дообучения (Full Fine-Tuning, FFT) до применения адаптеров – дополнительных слоев, обучаемых под конкретные задачи [38].

Дообучение LLM помогает в персонализации ответов модели. Оно делает модель менее требовательной к наличию длинных, детализированных промтов и повышает качество предиктивных способностей LLM в специфичных для конкретной области задачах. Дообученная модель обладает теми же возможностями и применяется для решения тех же задач, что и базовая LLM, но способна работать в рамках этих активностей более направленно, с меньшим участием человека за счет меньшей потребности в объемном промте. В контексте бизнеса дообучение позволяет моделям учитывать корпоративную терминологию, особенности фирменного стиля компании, ее историю и другие аспекты, влияющие на процесс принятия решений.

Однако, чтобы персонализировать ответы модели с помощью дообучения, компании необходимо собрать и подготовить для этого собственные данные. Причем, во-первых, имеет значение количество данных. Хотя больший объем данных обычно означает повышение качества ответов модели, особенно с точки зрения персонализации, сбор этих данных ведет к увеличению сроков и раздуванию бюджета проекта. Компании требуется заранее оценить необходимый объем данных для достижения некоторого порога качества ответов модели (способы оценки этого качества рассматриваются в дальнейших разделах), чтобы не собирать, допустим, 10 000 примеров взаимодействий в формате вопрос-ответ с клиентами, когда того же порога можно было бы достичь, дообучив модель на 5000 сообщений. Либо компания может решить, что требуемые инвестиции не соответствуют ее возможностям, и сделать выбор в пользу персонализации с помощью, например, промтов. Во-вторых, данные должны быть достаточно качественными, чтобы тонкая настройка действительно имела смысл и была эффективной. Данные с большим количеством шума, пустых или нулевых значений или слишком однообразные, то есть не отражающие разнообразие информации в домене дообучения, могут только ухудшить результаты работы модели. В-третьих, если дообучение проводится по методу дообучения с учителем (Supervised Fine-Tuning, SFT), то данные требуют разметки, то есть ручной классификации и маркировки. Формирование наборов данных для дообучения моделей – отдельное направление исследований [39], это процесс ресурсо- и трудоемкий, времязатратный и требующий экспертного подхода, что необходимо учитывать, выбирая подход тонкой настройки как альтернативу базовым LLM.

Кроме того, дообучение LLM на личных или корпоративных данных сопряжено с определенными угрозами безопасности [38]. К ним относятся, например, атаки на определение принадлежности (Membership Inference), когда злоумышленник хочет узнать о вхождении конкретного примера в тренировочный набор, или атаки извлечения данных, позволяющих получить конфиденциальные, частные сведения на основе их представления внутри модели или ее ответов. Также существуют бекдор-атаки (Backdoor), цель которых – внедрить уязвимости или вредоносные паттерны поведения в модель, манипулируя процессом дообучения. И это лишь несколько видов угроз, сопряженных с процессом дообучения. Разумеется, есть и методы защиты: анонимизация данных, дифференциальная приватность, федеративное обучение и другие – однако у них есть свои ограничения, во многом связанные с многообразием как способов дообучения [40], так и видов угроз и соответствующей невозможностью полностью унифицировать и стандартизировать процесс защиты конфиденциальности при работе с дообученными LLM.

На сегодняшний день не ясно, есть ли надежный способ безопасной работы с конфиденциальными данными при необходимости разделения прав доступа. Например, если модель дообу-

чалась на данных, которые содержат сведения о зарплатах сотрудников, то велика вероятность, что сотрудники, для которых доступ к этим сведениям закрыт, смогут взломать модель, чтобы получить эти сведения. У LLM архитектурно отсутствуют механизмы, позволяющие обеспечить абсолютное и надежное разграничение прав доступа к данным, на которых она обучалась.

Дообучение может требовать значительных вычислительных ресурсов [35]. Для снижения этих требований применяют методы параметрически эффективной тонкой настройки (Parameter-Efficient Fine-Tuning, далее – PEFT), суть которых заключается в уменьшении количества параметров, настраиваемых при дообучении. Использование PEFT делает дообучение намного доступнее, но, во-первых, требует неоднократных экспериментов, чтобы найти баланс между экономией ресурсов и сохранением качества модели, а во-вторых, в зависимости от базовой модели и параметров дообучения по-прежнему зачастую может быть проведено не на любом устройстве: даже с уменьшенным количеством обучаемых параметров. Дообучение чаще всего требует применения графических ускорителей. Требования к оборудованию делают тонкую настройку LLM потенциально дорогим процессом для компании.

Масштабирование системы на основе дообученной модели и поддержание ее в актуальном состоянии также влечет за собой некоторые трудности [35]: появление новых данных означает необходимость вновь проводить тонкую настройку. Учитывая темпы увеличения объема данных в современном мире, компании может быть нелегко адаптировать свою инфраструктуру так, чтобы динамически обновлять LLM, особенно при нехватке достаточных вычислительных мощностей.

Так, тонкая настройка дает возможность обойти ограничения базовых LLM, связанные с персонализацией и нехваткой узкоспециализированных знаний у модели, позволяя учесть особенности сферы деятельности и базу знаний конкретной компании. Однако преимущества этого подхода неразрывно связаны с потенциальными трудностями его внедрения, включая требования к качеству и количеству данных, проблему сохранения их безопасности, необходимость регулярного обновления системы и значительные вычислительные затраты.

### 3.3. Генерация с дополненной выборкой

Концепция генерации с дополненной выборкой (Retrieval-Augmented Generation, далее – RAG) впервые была представлена в исследовании, опубликованном в 2021 году [41], и была, как и тонкая настройка, ориентирована на решение проблемы недостатка знаний базовых LLM в узких сферах. Однако в отличие от дообучения в этом подходе данные, используемые для улучшения качества работы модели в конкретном домене, существуют отдельно от LLM, во внешней базе данных.

На рис. 1. представлена обобщенная архитектура RAG-системы. Модуль поиска, получая запрос, извлекает из векторной базы данных, содержащей данные по соответствующему запросу домену, данные, наиболее актуальные запросу, – извлеченные данные называют контекстом. Затем система объединяет полученный контекст со своим исходным промтом, и LLM-модель, находящаяся в сердце RAG-системы, генерирует на этой основе ответ. Считается, что исходная предобученная модель в этом случае – параметрическая память RAG-системы, а база данных (как правило, векторная) – непараметрическая память [41]. Данные в векторную базу помещаются после деления на кусочки или же чанки (Chunking) и последующего их преобразования в векторы с помощью модели векторизации (Embedding, далее – эмбединг). За извлечение контекста из базы в свою очередь отвечает модуль поиска, также называемый ретривером (Retriever).

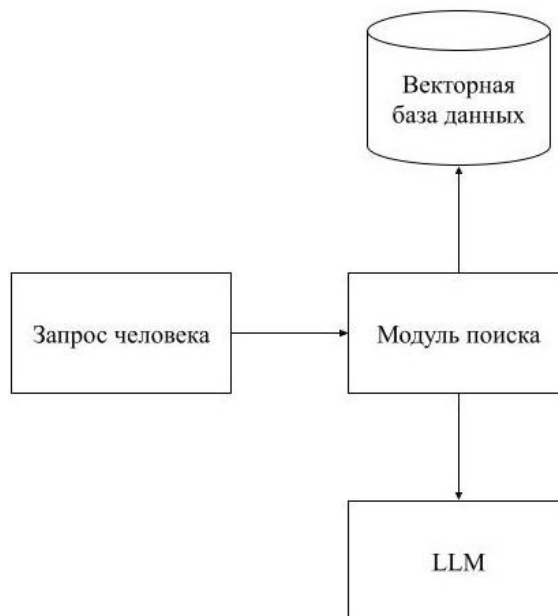


Рис. 1. Обобщенная архитектура RAG-системы  
Fig. 1. Generalized architecture of the RAG system

Эта концепция решает проблему обновления и масштабирования данных, свойственную подходу с дообучением, поскольку при любых изменениях достаточно обновить только содержимое внешней векторной базы данных – нет необходимости заново проводить дообучение, что снижает затраты и ускоряет внедрение новых знаний. При этом достигается аналогичный результат – ответы модели больше соответствуют нуждам конкретного пользователя или компании, чем в случае с базовыми LLM, которые ничего не знают о специфике организации, ведь они не обучались на закрытых данных компании, только на публичных данных.

RAG также снижает склонность LLM к галлюцинациям за счет своей непараметрической памяти [35]. В зависимости от системного промта модели может быть позволено больше или меньше свободы действий: она может как самостоятельно рассуждать, чтобы принимать решения даже при наличии неоднозначности в извлеченном контексте или противоречий между найденными фактами, так и быть полностью ограниченной в предположениях на основе своей параметрической памяти и контекста, полученного на этапе извлечения данных из векторной базы.

В RAG-системе может быть реализовано разграничение доступа пользователей к данным. В случае тонкой настройки данные «вшиваются» в модель, то есть каждая дообученная LLM имеет доступ ко всей информации, на которой она дообучалась, что создает угрозу извлечения этих данных злоумышленниками. В случае RAG-системы модель может оставаться универсальной, а регулировать доступ к данным можно на уровне внешнего хранилища. Тогда в рамках одной организации сотрудники могут взаимодействовать с одной и той же последовательностью процессов (Pipeline, далее – пайплайн), но иметь доступ к разным сегментам базы данных, что повлияет на извлекаемые модулем поиска части релевантного контекста. Возможность строго и детерминированно ограничить доступ к информации является ключевым функциональным преимуществом RAG-систем в корпоративной среде, где ведется работа с конфиденциальной информацией.

В случае RAG увеличение затрат по сравнению с базовой LLM меньше, чем в случае тонкой настройки [35]. Конечно, использование и поддержание внешней базы данных, модели векторизации и механизма извлечения данных из базы также требует вычислительных ресурсов, экспертов и времени, однако эти процессы, как правило, менее требовательны, чем процесс дообучения LLM. Во многом реализация RAG-системы сводится к решению инженерной задачи проектирования и реализации информационной системы с использованием стандартных технологий и архитектурных паттернов, в то время как дообучение LLM является задачей из области машинного обучения или науки о данных, где результат требует исследований и экспериментов и сам результат не гарантирован и сложно предсказуем.

При использовании RAG подхода могут возникать трудности в ситуациях, когда объединенная длина информации из базы и исходного промта превышает допустимую длину контекста модели [35]. В таких случаях приходится прибегать к сокращению подаваемой модели информации, что может негативно сказываться на результатах ее работы, поскольку в контексте может не оказаться фактов, необходимых для правильного вывода. Подобный риск также возникает по причине того, что ретривер находит в базе данных множество подходящих чанков, но в контекст попадает только несколько из них с наибольшим коэффициентом сходства с запросом [42]. Соответственно, возможно, что найдено девять чанков, из них взято три с лучшим коэффициентом сходства, допустим, 0,93; 0,92; 0,91, а четвертый, с коэффициентом 0,89, уже не попал в контекст, хоть и содержал важную информацию. Одним из возможных способов избежать потери ценных чанков является добавление метаданных (например, имя документа и порядковый номер чанка) при сохранении чанков в векторную базу, чтобы при поиске, например, точно просмотреть все чанки из конкретного документа. Этот метод также поможет в случае неправильного нарезания чанков, из-за которого могут быть разорваны семантические связи в данных – наличие информации об имени исходного документа и порядке чанков в нем позволит восстановить целостность контекста.

Стоимость и срок внедрения RAG-системы ниже, чем у дообученных моделей, однако поскольку RAG в любом случае подразумевает последовательный процесс – извлечение данных и только после этого генерация, – это приводит к увеличенному времени задержки между запросом пользователя и ответом системы. Время обработки запроса пользователя также увеличивается по мере усложнения архитектуры пайплайна, добавления в него дополнительных этапов: предобра-



ботки данных, реранжирования чанков и др. [35]. Для снижения этой задержки применяют различные методы: предзаполнение семантического кеша часто повторяющимися вопросами, подбор техники индексации, которую использует векторная база данных, — однако универсального решения нет. Более того, по мере расширения базы данных зачастую практически невозможно не пожертвовать точностью поиска по базе, извлечения данных или генерации ответа в пользу снижения задержки. Снизить ее позволяет, например, поиск меньшего числа релевантных чанков, использование только поиска по векторам без учета метаданных, применение более простых моделей векторизации и LLM [43].

Многоступенчатость RAG-систем также затрудняет ее оценку и настройку, поскольку каждый из этапов пайплайна настраивается индивидуально, и различные конфигурации этапов могут выстраиваться в пайплайн в различных комбинациях и произвольной длины. Требуется проводить тестирование и оценку как всей системы целиком, так и каждого отдельного компонента, что делает процесс оценки качества RAG-системы многоплановым.

Стоит отметить, что тонкая настройка и RAG могут использоваться в комбинации. Наиболее распространенным случаем является использование дообученных LLM в качестве генеративного компонента пайплайна вместо их предобученных версий. Дообучение адаптирует «язык» модели под стилистическую специфику и терминологию конкретной области, а RAG позволяет поддерживать фактические данные в актуальном состоянии, динамически обновляя их. Кроме LLM дообучение в RAG-системах может применяться к моделям векторизации, используемым и на этапе загрузки данных в векторную базу, и на этапе работы ретривера для преобразования запроса в вектор, на основе которого будет осуществляться поиск по сходству среди векторов в базе.

На текущий момент RAG является одним из самых активно развивающихся направлений как в научных исследованиях, так и в прикладной разработке. Сочетая в себе персонализацию ответов, возможности разграничения доступа к данным, своевременного обновления данных, возможности ссылаться на источники информации в ответах, снижение уровня галлюцинаций и затрат на процессы, связанные с обучением и дообучением моделей, этот подход становится стандартом внедрения LLM в корпоративной среде [44]. При этом внедрение RAG-систем порождает множество вопросов, подлежащих исследованию, таких как: сокращение времени задержек ответа, повышение эффективности поиска, наиболее оптимального хранения данных, методов оценки пайплайна, сохранения конфиденциальности, повторной индексации при смене механизма извлечения эмбедингов и своевременного обновления базовых моделей.

#### **4. Проблемы оценки систем, основанных на больших языковых моделях**

Оценка систем, основанных на больших языковых моделях, в частности, оценка итогового ответа, сгенерированного языковой моделью, означает присвоение выражению, сформулированному на естественном языке, числового значения, отражающего соответствие ответа определенному, сформулированному заранее одному или нескольким критериям. Статистические методы оценки показывают низкую корреляцию с оценками человека, и это не позволяет использовать их на практике [45]. Одной из причин низкой корреляции с оценками человека можно назвать неспособность статистических моделей к построению семантических связей во входных последовательностях. У современных больших языковых моделей есть возможность эффективно имитировать процесс человеческой оценки, что открывает возможность использования данных моделей при оценке систем, результатом работы которых являются выражения, сформулированные на естественном языке в свободной форме.

Такой подход к оценке ответов систем, основанных на больших языковых моделях, называется LLM-как-судья (LLM-as-a-judge) [46]. У данного подхода есть существенные проблемы. Для применения подхода требуется корпус вопросов, итоговых ответов и оценок этих ответов. Также должны быть сформулированы правила оценивания ответа на вопрос, то есть шкала оценок с ее описанием на естественном языке — ровно в таком виде, чтобы человек, прочитавший ее и имеющий знания в доменной области, мог эффективно оценивать ответы. Со стороны LLM характерны искажения: смещение оценки из-за позиции варианта в списке, «подхалимство» — симпатия к стилю генерации моделей, имеющих схожую архитектуру и обученных на тех же данных, а также уязвимость к атакам в формулировке запроса [47, 48]. В этот список можно отнести и фактор случайности, мешающий воспроизводимости оценок. Случайность проявляется даже

при установке температуры модели на значение 0 – повторные запуски одного и того же запроса могут приводить к разным оценкам [49]. Температура – настраиваемый на уровне всей модели параметр, определяющий степень детерминизма в процессе генерации токенов. Чем выше температура, тем выше фактор случайности при выборе каждого последующего токена, это обусловлено сглаживанием распределения вероятностей токенов.

Решение указанных проблем в значительной степени связано с введением формализованных протоколов оценивания и требованием к структурированному формату вывода (Structured Output). Вместо итоговой оценки от модели, выраженной числом, структурированный вывод предполагает декомпозицию оценки, позволяющую модели шаг за шагом выполнить операции, которые при процессе оценки выполняет человек для формирования итогового значения (например, общее соответствие ответа теме вопроса). Данный подход позволяет снизить вариативность оценок, повысить корреляцию с человеческими оценками [50]. Для ответа на вопросы, получение которых происходит с использованием внешних источников, как, например, в RAG-системах, также можно требовать от модели явного указания цитат из источников, послуживших основанием для оценки ответа [51].

## **5. Лучшие практики применения больших языковых моделей в корпоративных информационных системах**

Практика использования больших языковых моделей в корпоративных информационных системах появилась относительно недавно. Рассмотрим несколько удачных практик проектирования систем с применением больших языковых моделей, ориентируясь на которые можно снизить временные затраты на разработку и поддержку данных систем.

Рациональным принципом проектирования архитектуры системы с применением LLM может являться постепенное и своевременное ее усложнение. Начинать следует с простых архитектур, например, таких как цепочка последовательных вызовов LLM. Усложнять архитектуру системы, то есть добавлять в пайплайн новые шаги, задействующие LLM, требуется только в том случае, если уже реализованная архитектура не позволяет достичь целевого значения по метрике качества.

Замену уже используемой в системе большой языковой модели на новую стоит рассматривать в случае улучшения показателей метрик системы при использовании новой модели по сравнению со значениями метрик старой и готовности специализированного программного обеспечения к запуску новой модели. Под готовностью специализированного программного обеспечения подразумевается прежде всего не только базовая поддержка новой модели для запуска, но и наличие соответствующих программных оптимизаций для повышения скорости работы новой модели. Не следует гнаться за обновлениями моделей, новейшие версии зачастую еще какое-то время не поддерживаются экосистемой, нужно ждать. Можно порекомендовать цикл обновления раз в квартал и брать только модели, которые уже протестированы, а инфраструктура их поддерживает нативно.

Для более прозрачного процесса поддержки и улучшения корпоративных систем с использованием больших языковых моделей необходимо иметь для каждого этапа получения итогового ответа набор тестовых данных. Это позволяет оценивать производительность текущей модели и изучать влияние изменений в одних этапах на другие, ведь они все связаны по цепочке и сбой в одном этапе будет вызывать каскадный сбой и искажения в последующих.

Значительного повышения качества ответов (производительности) системы с использованием LLM без усложнения самой архитектуры возможно достичь, тщательно улучшая промты, подаваемые на вход модели. Использование формата структурированного вывода позволяет направлять генерацию модели по заранее определенному пути, что тоже позволяет повысить итоговую производительность системы.

При оценке производительности системы, использующей LLM, также стоит опираться на обратную связь от конечных пользователей системы, если они доступны и могут ей поделиться. Человеческая оценка до сих пор остается самой достоверной в сравнении с LLM-as-a-judge и статистическими методами [52].

Обсудим также и применение больших языковых моделей в написании программного кода, поскольку они все чаще играют роль систем поддержки принятия решений в разработке ПО.

Эффективность системы, основанной на LLM и предназначенной для разработки программного обеспечения, во многом зависит от паттерна архитектуры проекта. Стоит рассматривать проработанные подходы, например, паттерны предметно-ориентированного программирования (Domain-Driven Design, DDD), программирования на основе функциональных срезов (Feature-Sliced Design, FSD) и подобных. Поскольку LLM показывают лучшие результаты при работе с небольшим контекстом и имеют свойство терять детали при работе с длинным контекстом [53], эффективней будет решаться задача, для постановки которой необходимо будет минимальное число токенов. Указанные ранее паттерны программирования позволяют снизить длину формулировки задачи для LLM, поскольку этому способствует проработанная структура программного проекта, а также высокий уровень абстракции и способ управления зависимостями. Допустим, текущий проект построен по DDD, тогда для внедрения нового функционала в одну из сущностей необходимо будет передать LLM ее описание и формат взаимодействия с остальными сущностями проекта, что в общем случае занимает небольшое число токенов в сравнении со случаем, где в силу архитектуры проекта пришлось бы передавать полный код нескольких классов. Вторым значимым фактором в эффективности такой системы является наличие автоматизированных тестов, позволяющих оперативно оценивать результат работы системы и предотвращать непредвиденные ошибки. Стоит отметить, что лучшие архитектурные паттерны еще не определены и нет достаточных исследований на этот счет. Здесь можно руководствоваться гипотезой о том, что чем лучше структурирован подход, пусть даже избыточно для простых случаев, тем лучшие результаты сможет предоставлять LLM.

Внедрение LLM в корпоративную систему стоит рассматривать при том условии, что более простые алгоритмы по выполнению задачи не дают ожидаемого результата либо для задачи нет возможности сформулировать алгоритм решения, но при этом ее может решить человек, а также при условии отсутствия необходимости в высокой интерпретируемости полученного решения, то есть можно руководствоваться принципом лишь бы работало.

Это обосновано рисками внедрения LLM, которые будут описаны далее. Внедрение LLM в корпоративную систему стоит рассматривать только если это единственное решение и его преимущества и возможности перевешивают риски внедрения.

## **6. Сравнение подходов к интеграции больших языковых моделей в корпоративные системы**

В целях структурирования информации по основным подходам работы с LLM в ходе исследования было проведено сравнение вариантов интеграции LLM по ряду критериев, результаты которого представлены ниже. Сравнительный анализ подходов проводился с точки зрения использования каждой альтернативы в корпоративной системе, предназначенной для ответа на вопросы, возникающие у людей, включая как клиентов, так и сотрудников, в отношении компании. В сравнении участвуют три подхода: использование LLM (подразумевает собой направление запросов в LLM с фиксированным системным промптом), использование дообученной LLM (дополнительно обученная LLM на корпусе данных компании с фиксированным системным промптом), использование RAG (система с LLM с фиксированным промптом для генерации итогового ответа, модулем поиска для нахождения релевантных запросу данных и векторной базы данных для хранения информации).

В пунктах отражены критерии сравнения, в пояснениях к ним – оценка подхода по критерию.

### **1. Возможность адаптироваться к домену**

LLM: присутствует только при задании соответствующего промта, понимание домена ограничено.

Дообученная LLM: присутствует, зависит от данных, используемых для адаптации к домену.

RAG: аналогично дообученной LLM.

### **2. Требования к реализации решения**

LLM: необходим провайдер модели, либо инфраструктура для локального запуска.

Дообученная LLM: более высокие требования к мощности локальной инфраструктуры для дообучения в сравнении с запуском.

RAG: помимо тех же требований, как к LLM, необходима дополнительная инфраструктура в

виде векторной базы данных, модели для векторизации информации. Дополнительные требования зависят от реализации RAG.

*3. Возможность ссылаться на источники информации при ответе*

LLM: возможно, если все источники помещаются в контекстное окно модели, однако результаты становятся нестабильными с ростом контекста [53].

Дообученная LLM: возможно в теории, однако на практике результаты оказываются нестабильными.

RAG: присутствует.

*4. Время ожидания ответа*

LLM: зависит от выделенных ресурсов, числа параметров LLM и оптимизации программного обеспечения.

Дообученная LLM: аналогично LLM.

RAG: из-за дополнительных этапов (модуль поиска, несколько запросов к LLM для оценки источников и для генерации ответа) чаще всего выше, чем у альтернатив.

*5. Возможность оперативно обновлять контекстную информацию*

LLM: затруднено, но возможно при оперативном обновлении промта модели. Однако изменение промта может повлечь снижение качества ответов.

Дообученная LLM: обновление устаревшей информации становится практически невозможным, так как модели не способны переучиваться.

RAG: обновить информацию легче, добавив ее векторное представление в базу данных.

*6. Склонность к галлюцинациям*

LLM: высокая, если в промте отсутствует релевантная информация. Если в промте отдельно прописаны инструкции, требующие отвечать, что информации по запросу нет, то вероятность галлюцинаций снижается.

Дообученная LLM: ниже, чем в LLM за счет того, что в силу дообучения модель запоминает больше информации, чем помещается в контекстное окно при стандартном промптинге.

RAG: Минимальная за счет присутствия первоисточника в контексте модели.

*7. Возможность работы с большим объемом информации (10 тысяч токенов и более)*

LLM: отсутствует в силу невозможности уместить ее в контекстное окно. Даже при условии того, что необходимая информация не занимает все контекстное окно, эффективность ответов значительно падает при объеме, сравнимом с размером контекстного окна.

Дообученная LLM: присутствует, но эффективность падает с ростом объема информации.

RAG: присутствует, эффективность не зависит от объема информации. Эффективность зависит от метода построения поискового индекса и модуля поиска релевантных данных в векторной базе данных.

*8. Возможность генерировать ответы в зависимости от истории запросов и профиля пользователя*

LLM: генерация ответов с учетом профиля и истории запросов пользователя невозможна на практике, поскольку требует заранее предопределенного списка пользователей и их предпочтений, а также их постоянности.

Помещать историю запросов каждый раз в промт не позволяет ограниченный контекст.

Дообученная LLM: аналогично LLM.

RAG: возможна при реализации механизма памяти, сохраняющего детали профиля пользователя в векторную базу данных.

Отдельно стоит рассмотреть агентов искусственного интеллекта, которые уже сейчас применяются в корпоративных информационных системах, поскольку возможности применения LLM – ограничены. ИИ-агенты (агенты искусственного интеллекта) – это следующая ступень развития использования нейросетей в бизнес-системах, которая требует расширенных критериев оценки.

**7. Агенты искусственного интеллекта**

На рис. 2 представлена обобщенная архитектура агентной системы на основе искусственного интеллекта. Генеративный ИИ-агент – система, которая управляет взаимодействием LLM с ее окружением для достижения цели, определенной пользователем, с помощью доступных модели инструментов [54]. Агенты способны действовать автономно, без прямых пошаговых указаний от

пользователя, на основе заданной задачи. Они способны самостоятельно планировать, какие шаги им необходимо предпринять, в каком порядке и с какими инструментами взаимодействовать.

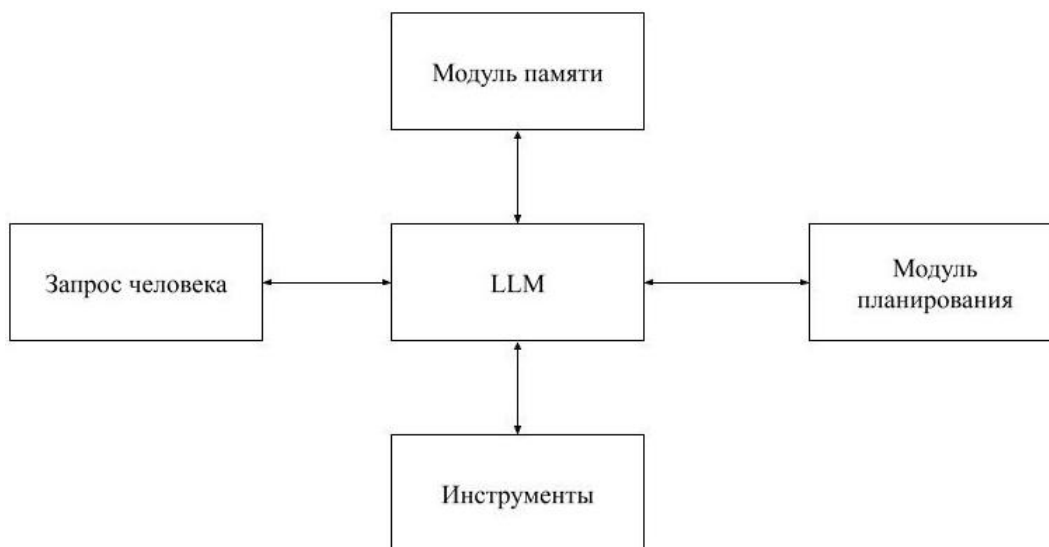


Рис. 2. Обобщенная архитектура агентной системы на основе искусственного интеллекта  
Fig. 2. Generalized architecture of an agent system based on artificial intelligence

LLM является «мозгом» агента, выполняя в такой системе не просто функцию генерации итогового ответа: модель также отвечает за планирование, разбивая задачу на поэтапные шаги. Для этого применяются такие техники рассуждения моделей, как ReAct (рассуждение + действие), цепочка размышлений (Chain-of-Thought) или дерево размышлений (Tree-of-Thoughts) [54]. Планирование, или оркестрирование, – критически важный модуль (слой) в архитектуре агентов, поскольку управляет памятью, текущим состоянием агента, процессами рассуждения и принятия решений.

Память также является модулем архитектуры агента. Она позволяет сохранять как данные в рамках отдельной сессии пользователя, так и информацию о прошедших взаимодействиях, их частичный контекст и результаты, которые в будущем могут использоваться для задач со схожим контекстом.

Отдельным компонентом системы является модуль, отвечающий за использование агентами различных инструментов для взаимодействия с внешней средой. Как правило, инструменты интегрируются с помощью стандартных API (Application Programming Interface) операций [54], позволяя агентам, например, взаимодействовать напрямую с базами данных или делать запросы в Интернет. Это позволяет системам обрабатывать информацию, получаемую в масштабе, близком к реальному времени, и действовать на ее основе. Инструменты создают взаимосвязь между внутренней вычислительной и аналитической мощностью LLM и возможностями IT-систем, существующих во внешней среде. В настоящий момент зарождаются и формируются общепринятые стандарты взаимодействия агентов с внешней средой, такие как, например, MCP (Model Context Protocol) [55]. Кроме того, разрабатываются протоколы для взаимодействия самих агентов между собой, например, A2A (Agent to Agent Protocol) [56]. Индустрия видит в этих стандартных протоколах будущее для объединения инструментов в любых комбинациях для решения сложных, комплексных задач.

Текущий ход исследований и развития ИИ-агентов характеризуется быстрыми инновациями со стороны академических учреждений и лидеров индустрии. Такие организации, как IBM, Microsoft, AWS и Anthropic разрабатывают все более сложные архитектуры агентов, а команды исследователей в университетах предлагают новые бенчмарки (Benchmark) и системы оценки [57]. Развитие ИИ-агентов объединяет интересы академической и коммерческой сфер, и их совместный вклад значительно ускоряет прогресс этого направления.

ИИ-агенты уже активно применяются в корпоративной среде, изменяя бизнес-процессы, выполняя роль инструмента поддержки принятия решений и оптимизируя повседневный ход дея-

тельности предприятий. Они постепенно заменяют предыдущие технологии ML/AI, ранее применяющиеся в VI-системах. Доступ к инструментам и способность действовать автономно позволяют агентам объединять в себе функционалы различных инструментов аналитики, планирования и генерации контента. За счет взаимодействия с данными в реальном времени они обладают повышенной адаптивностью к сложным сценариям и изменяющимся обстоятельствам, из-за чего активно применяются в автоматизации бизнес-процессов и в DSS [57]. Использование агентов в сфере CRM позволяет снизить затраты на содержание соответствующего отдела, уменьшить среднее время ожидания ответа от службы поддержки и обеспечить ее круглосуточную работу [57]. Также одним из самых распространенных способов применения ИИ-агентов является использование их в качестве интеллектуальных помощников в бизнес-коммуникации и разработке ПО, где они задействуются в рутинных задачах написания сообщений или кода соответственно.

На самом деле сейчас сложно найти часть корпоративной деятельности, которую еще не затронули ИИ-агенты в той или иной степени. Кроме предприятий они используются и индивидуальными пользователями в личных, учебных и рабочих целях: от составления списка покупок или бюджета до формирования резюме и обучения. К помощи агентов также прибегают в медицине, урбанистике, сельском хозяйстве и других сферах [57].

При этом ИИ-агенты во многом имеют те же недостатки прошлых LLM и основанных на LLM альтернатив: вопрос ограниченности контекста, необходимость качественного промта, безопасность извлекаемых данных, прозрачность ответов, риск галлюцинаций и прочее. По мере развития самих LLM, использующихся в ядре агентов, и методов реализации других компонентов их архитектуры, многие из этих проблем становятся менее и менее заметными, однако совершенствование и распространение ИИ-агентов становится все более значимым поводом для обсуждения с точки зрения их непосредственного влияния на сферы, где они применяются, и на деятельность человека в них. Влияние ИИ на рынок труда, качество образования, творческую сферу, на способность человека действовать самостоятельно, рассуждать и мыслить критически рождает множество поводов для исследований и дискуссий.

## **8. Вайб-кодинг как новый подход к разработке программного обеспечения и его риски**

Вайб-кодинг (Vibe Coding) – это довольно экстремальный подход к разработке программного обеспечения, характеризующийся делегированием написания программного кода, его отладки и проектирования архитектуры ПО с человека на LLM. Роль человека при этом заключается в формулировании требований к ПО и передаче их в LLM посредством промтинга. Зачастую для вайб-кодинга характерно неформальное выражение требований к ПО. Термин вайб-кодинг появился в начале 2025 года и получил распространение благодаря высказыванию Андрея Карпатого [58].

Можно выделить несколько характерных черт подхода, основанного на передаче работ по непосредственному исполнению задач от человека к LLM, причем он применяется как в разработке программного обеспечения, так и в других сферах, где можно делегировать выполнение работы посредством программных инструментов, например, закупки по требованиям, обработка заявок, то есть любая деятельность, где человек работает по скрипту и «скрепляет» собой инструменты. Отличительной чертой так называемого вайб-кодинга является тот факт, что процесс реализации идеи происходит при помощи диалога между человеком и LLM на естественном языке. Также для данного подхода характерно снижение или полное отсутствие необходимости владения техническими навыками в конкретной области для достижения желаемого результата, потому как современные LLM демонстрируют высокое качество в генерировании текста и программного кода на специализированных тестах качества [59]. Однако важно понимать, что рейтинги могут быть субъективны из-за утечек тестовых данных, на которых инструменты могут переобучаться, чтобы возглавить вершину рейтинга. Всегда необходимо проводить самостоятельное тестирование, включая модели, которые не находятся на первых позициях в списках лучших.

К возможностям, которые открывает вайб-кодинг, относятся снижение порога входа в разработку программного обеспечения, ускорение написания кода и прототипирования, освобождение части ресурсов человека и перенаправление их на планирование дальнейшего функционала разрабатываемого ПО. Способность LLM определять намерения человека из сформулированных на естественном языке предложений и реализовать их в программном коде позволяет

ускорять процесс создания программного обеспечения, и разработка при вайб-кодинге приобретает черты партнерства, где LLM отвечает за реализацию, а человек – за планирование и креативные задачи [58].

Применение вайб-кодинга может нести в себе как риски, связанные с низким качеством самой реализации ПО, то есть имеющие технический характер, так и риски, связанные с ухудшением навыков разработчиков, которое может стать следствием бесконтрольного использования ими такого подхода.

Код, сгенерированный моделью, может быть излишне усложнен, что в дальнейшем мешает специалистам поддерживать и развивать его. В силу возможной неверной интерпретации задачи со стороны LLM вайб-кодинг может повлечь непредвиденные изменения в кодовой базе программного обеспечения, как, например, добавление ненужного функционала, либо упрощение, удаление уже имеющегося. Кроме этого, процесс оценки работоспособности и качества кода становится менее прозрачным в сравнении с традиционными методами разработки, поскольку работа полностью делегируется LLM. Последствием приведенных рисков становится ускоренное накопление так называемого технического долга.

Вайб-кодинг вследствие делегирования исполнения технических задач LLM снижает у человека необходимость в критическом мышлении в процессе разработки, что со временем может быть причиной снижения уровня имеющихся у разработчика технических навыков, потому как при вайб-кодинге их использование больше не является необходимостью. Ослабление или потеря глубокого понимания технологий создают зависимость от LLM. В частности, из-за этого эффекта появляется уязвимость – при отсутствии доступа к LLM разработчики могут оказаться неспособными к разработке и поддержке программного обеспечения.

Можно выделить несколько принципов и условий, придерживаясь которых разработчик может применять подход вайб-кодинга без потери собственной эффективности и самостоятельности. Перечисленные далее условия релевантны в том случае, если вайб-кодинг используется программистом в качестве основного способа разработки. Для того чтобы предотвратить деградацию навыков, разработчику следует вручную реализовывать какую-либо часть поставленных задач, либо проводить оценку уже сгенерированного кода, решающего эти задачи. Определять соотношение задач с подробным разбором или ручной реализацией и задач, полностью делегируемых LLM, стоит исходя из личного опыта и уровня навыков разработчика – чем выше компетенции, тем меньшее число задач можно решать вручную без значительной деградации навыков.

Для обеспечения возможности дальнейшей поддержки и разработки ПО необходимо при его проектировании следовать архитектурным шаблонам, работая в рамках которых LLM должны показывать более стабильные, качественные и предсказуемые результаты. Список шаблонов и паттернов ни в коем случае не ограничивается лишь рассматриваемыми ранее DDD и FSD. Кажется, что хороший результат могут показывать любые хорошо документированные и структурированные подходы. Их применение позволяет контролировать зависимости проекта и формат кода, генерируемый в процессе вайб-кодинга, делая его предсказуемым, стандартизированным и понятным для разработчика. Также такой код проще тестировать и изменять без рисков затронуть другой функционал системы, что решает проблему непредвиденных изменений в программном обеспечении при вайб-кодинге.

В общем и целом если рассматривать применение вайб-кодинга или близкого к нему подхода, где человек согласовывает все изменения, для долгоживущих проектов требования к качеству кода должны быть строго регламентированы и в идеале их соблюдение должно верифицироваться не только человеком, но и автоматическими тестами. Не все такие тесты писать легко или даже возможно. Подход разработки программного обеспечения с глубокой интеграцией ИИ-агентов выглядит многообещающим, но все еще весьма нестабильным и высокорискованным сегодня.

Стоит отметить, что вайб-кодинг, применение которого согласовано с вышеизложенными принципами, может стать управляемым и эффективным процессом, полностью раскрывающим плюсы подхода и минимизирующим его отрицательные стороны. Однако для индустрии этот путь может оказаться ложным, ведущим к быстрому росту и дальнейшему откату и катастрофическому разочарованию от несбывшихся надежд о высокой скорости поставки изменений и снижении накладных расходов на разработку за счет сокращения количества вовлекаемых в процесс людей, которым необходимо платить заработную плату.

## 9. Риски внедрения больших языковых моделей

Внедрение LLM в корпоративные системы сопряжено с рисками, связанными со спецификой работы этих моделей.

Одним из главных рисков внедрения LLM в коммерческие продукты компании либо в ее внутренний контур, где цена ошибки высока и от точности и предсказуемости ответов зависит репутация компании, на данный момент являются галлюцинации. Они делятся на две основные категории: внутренние и внешние. В первом случае сгенерированный моделью ответ противоречит данным, на которых она обучалась, а во втором – ответ не может быть ни подтвержден, ни опровергнут тренировочной выборкой. В случае LLM чаще встречается именно второй тип, во многом потому, что эти модели обучаются на огромном объеме данных, зачастую содержащих противоречащие друг другу факты. По этой причине одним из ключевых методов нейтрализации этого риска считается улучшение качества данных, используемых для обучения. Тонкая настройка и RAG также считаются более предпочтительными подходами для внедрения LLM с точки зрения галлюцинаций, чем базовые LLM, из-за более точной и узкоспециализированной выборки данных, на которые опираются модели при ответе. Хотя цена получения более качественных данных может быть слишком высокой для большинства предприятий.

Помимо галлюцинаций опасность представляют атаки на LLM, позволяющие злоумышленникам получить системный промпт модели, заставить модель переписать доступную ей информацию или склонить к выполнению каких-либо действий в обход системных инструкций [60].

Отдельно стоит рассмотреть риски внедрения LLM в качестве разработчика программного обеспечения. Траектория роста компетенций нового программиста подразумевает сначала освоение базовых технических навыков, включающих синтаксис языка или языков программирования, затем постепенное накопление практического опыта при решении задач совместно с углублением в архитектурную составляющую. LLM, используемая в качестве универсального исполнителя, не позволяет неопытному программисту в должной степени овладеть необходимыми ему для профессионального роста базовым техническим навыкам. В такой ситуации начинающий специалист вынужден миновать освоение азов профессии и сразу управлять разработкой при помощи LLM. Это проблема, ведь для эффективной разработки при помощи LLM программисту необходимо обладать глубокой экспертизой в программировании и используемом стеке технологий, а также пониманием архитектурных паттернов и умением их применять, а эти навыки появляются только со временем за счет получения собственного опыта, путем решения задач вручную, а не с помощью LLM. Есть риск, что индустрия станет более закрытой для новичков, где позиции экспертов, учившихся десятилетиями за счет медленной постепенной практики, лишь усилятся, а приток начинающих специалистов снизится за счет реализации идеи экономии на найме и обучении новых сотрудников.

Такой сценарий может поставить отрасль разработки программного обеспечения вместе со сферой подготовки этих кадров в сложное положение, при котором лишь усугубится кризис предложения, которое будет значительно превышать спрос на рынке труда. Эта тенденция наблюдается уже сейчас. Вовлечение же специалистов с непрофильным образованием в сферу информационных технологий может оказаться под еще большим вопросом, ведь задачей, стоящей перед новыми специалистами, будет быстро стать архитекторами программного обеспечения, а это не позволит людям без глубокой фундаментальной базы эффективно продвигаться вперед по карьерной лестнице.

Развитие ИИ-агентов, в свою очередь, несет в себе уникальные риски. При использовании агентов в корпоративных системах важно контролировать среду, доступную агенту, тщательно оценив безопасность доступных ему инструментов, потому как при наличии потенциально опасного инструмента, допустим, права на выполнение команды в консоли от имени суперпользователя, существует вероятность исполнения вредоносного сценария как вследствие атаки на агента, так и вследствие галлюцинаций. Примером такого сценария в данном случае может служить команда удаления домашних каталогов пользователей, использованная агентом во время установки сторонних пакетов.

С точки зрения человеческих ценностей существует риск расхождения ценностей искусственного интеллекта и ценностей человека [61]. Высокий уровень развития искусственного интеллекта не означает, что его финальные цели соответствуют международным нормам морали и



права. Иными словами, интеллект сам по себе не гарантирует полное отсутствие вредоносного поведения. Процесс согласования ценностей искусственного интеллекта и ценностей человечества называется выравниванием (Alignment) и представляет собой активно исследуемую область исследований LLM [62]. В каком-то смысле искусственный интеллект можно рассматривать в качестве психопата – того, в ком нет эмпатии, нет эмоций.

### 10. Будущее применения искусственного интеллекта в бизнесе

Уже сейчас использование LLM становится частью повседневной практики в различных направлениях бизнеса. Компании внедряют вопросно-ответные системы на базе LLM для улучшения взаимодействий с клиентами, пробуют применять ИИ-агентов в создании контента, разработке ПО, BI-задачах и не только. На основе этого меняется природа рабочих процессов, зарождаются новые методики: например, вайб-коддинг в разработке. Умение взаимодействовать с LLM и с ИИ-агентами становится обязательным требованием многих работодателей по аналогии с тем, как десятилетия назад таковым становилось умение работать с компьютером и офисными программами. ИИ становится элементом технологического стека компаний, и по степени инновационного влияния этот процесс сравним с изобретением парового двигателя в XIX веке [63].

В ближайшее время можно ожидать усиления текущих тенденций. Вайб-коддинг будет развиваться как отдельная методика со своими лучшими практиками, сферами и антисферами применения и способами митигации рисков, связанных с ним. Упрощение процесса написания кода и, соответственно, снижение порога входа в сферу программирования приведет к большому количеству небольших, одноразовых программных решений. Теперь многие вопросы, с которыми сотрудники других направлений обращались в ИТ-отдел, можно будет решить самостоятельно, воспользовавшись агентом. Кода в целом станет больше – отчасти из-за того, что его легче написать, а отчасти потому, что он потребуется для построения корпоративных систем вокруг ИИ и создания «прослойки» для взаимодействия сотрудников с LLM или агентами.

Возможность делегировать задачи ИИ-агентам может стать определяющим фактором получения компанией преимущества перед конкурентами [64]. Организации будут стремиться при наименьших возможных затратах получить наиболее «умные» модели – не идеальные, но достаточно точные и стабильные для решения их задач. Умение грамотно делегировать задачи ИИ, включая написание эффективной инструкции, предоставление нужного контекста и проверку итогового ответа, станет необходимым навыком для сотрудников разных уровней и направлений.

Другой развивающейся тенденцией является интеграция рекламы в интерфейсы и ответы LLM на основе запросов пользователя. Некоторые компании, такие как OpenAI, Perplexity, Microsoft, уже рассматривают или используют эту концепцию в своих ИИ-продуктах. Со временем ИИ-агенты, вероятно, станут уникальным маркетинговым каналом, требующим отдельного внимания от специалистов по продвижению [65–67]. Вряд ли можно ожидать, что компании, владеющие сервисами на основе LLM, смогут полностью избежать соблазна примешивать к объективным данным продвижение выгодных им идей и услуг.

Рынок найма также может значительно измениться. Помимо уже упомянутых ранее требований к кандидатам обновится и процесс их отбора: с помощью LLM можно будет осуществлять «бесконечный» перебор в поисках сотрудника, наиболее точно подходящего под требования компании. Такая автоматизация рекрутинга реализуется уже сейчас, продолжая набирать все большую популярность [68].

С таким усилением внедрения ИИ в корпоративную среду лидерам компаний потребуется уделить отдельное внимание вопросам безопасности. Реальная вероятность катастрофического сценария развития искусственного интеллекта остается неопределенной, однако полностью ее отрицать на данный момент невозможно. Масштабы внедрения ИИ таковы, что подход к безопасности в этой сфере должен становиться таким же серьезным и институционализированным, как в сферах ядерной и биохимической безопасности [69], поскольку пока что не до конца известно, какие сценарии могут возникнуть и реализоваться и, соответственно, как действовать в каждом из них. Вероятно, в ближайшие годы появится практика создания внутри компаний специализированных подразделений, осуществляющих наблюдение за использующимися организациями ИИ-системами и их калибровку по технике обучения с закреплением на основе отзывов людей (Reinforcement Learning with Human Feedback) [69].

Скорость внедрения ИИ в бизнес в первую очередь означает необходимость успевать за всеми упомянутыми тенденциями. Если еще пару лет назад использование LLM и искусственного интеллекта было некой надстройкой над уже существующей инфраструктурой и информационной системой компании, то сейчас эти технологии встраиваются непосредственно в эти структуры, заменяя ранее применявшиеся подходы.

В ближайшем будущем в сфере ИИ требуется утверждение стандартов, методик, лучших практик, организационных единиц и прочих элементов, которые позволили бы регулировать темп, с которым происходит развитие в этой индустрии, причем как на уровне отдельных компаний, так и на мировом. Вопрос «Стоит ли внедрять ИИ?» уже не столь актуален: теперь рациональнее думать о том, как это сделать наиболее грамотно, эффективно, этично и безопасно.

### Заключение

Рассмотрев во временном разрезе развитие систем с математическими алгоритмами и переход к использованию искусственного интеллекта, понимаем – мы совершили прорыв и органично вступили в новую гонку для человечества. Сейчас не стоит вопрос о том, использовать ли искусственный интеллект в повседневной жизни и корпоративных системах. Ответ очевиден – использовать. Необходимо проектировать системы поддержки принятия решений таким образом, чтобы они были готовы к следующему витку в спирали бесконечного совершенствования алгоритмов искусственного интеллекта.

Ускорение бизнес-процессов и оптимизация рутинной работы человека за счет внедрения ИИ способствует новым свершениям в разных значимых сферах, например, медицине или производстве, а способность искусственного интеллекта искать нетривиальные закономерности на пересечении областей знаний позволяет за счет широты обучающих данных дополнить глубину знаний отдельных людей. Если рассматривать ИИ как обобщенное представление всех знаний человечества – то в лице умных алгоритмов мы находим поддержку в принятии наших решений.

Но нужно учитывать риски, чтобы гонка не привела нас к катастрофе. В частности, мы рискуем попасть в ситуацию, где слепое доверие ИИ приведет нас к тому, что мир стал состоять из галлюцинаций, дыр в безопасности и решений логичных, но тем не менее антигуманных. Передача полного контроля управлением из рук человека в «руки» ИИ на текущий момент невозможна, поскольку не установлены четкие этические рамки и зона ответственности ИИ.

Необходимо также не допустить деградации у человека критически важных способностей, которые ранее считались принадлежащими только людям, что сегодня тем не менее ставится под сомнение: креатив, критическое мышление и профессиональные навыки уже не рассматриваются как прерогатива интеллекта естественного. Человечество и корпорации должны найти способ обогатить свою жизнь за счет внедрения ИИ, а не допустить собственной деградации и разрушения.

Искусственный интеллект – это партнер, который помогает развитию человечества и ускорению рутинных процессов. Поиск синергии между искусственным и естественным интеллектом – это новый вызов для человечества. Будем надеяться, что этот вызов нам по плечу.

### Список литературы/References

1. Abu Naser S. Dynamic Programming as a Tool of Decision Supporting. *Journal of Applied Sciences Research*. 2009; 5(6):671–676.
2. Power D.J. A Brief History of Decision Support Systems. *DSSResources.com*. 2007.
3. Copeland B.J. MYCIN. *Encyclopaedia Britannica*. 2018.
4. Codd E.F. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. *Communications of the ACM*. 1970;13(6):11.
5. Oracle: website. Available at: <https://www.oracle.com/> (accessed 15.08.2025).
6. What is OLAP (online analytical processing)? *IBM: website*. Available at: <https://www.ibm.com/think/topics/olap> (accessed 15.08.2025).
7. Клеппман М. Высоконагруженные приложения. Программирование, масштабирование, поддержка. Sprint Book, 2025. 640 с. (Бестселлеры O'Reilly). [Kleppman M. *High-Load Applications. Programming, Scaling Support*. Sprint Book, 2025. 640 p. (O'Reilly Bestsellers Series) (In Russ.)]. Available at: <https://www.piter.com/collection/all/product/vysokonagruzhennye-prilozheniya-programmirovaniye-masshtabirovaniye-podderzhka-2> (accessed 15.08.2025).

8. Verma S., Rattan, P. Introduction to Data Mining Tools and Techniques Applications: A Review. In: *International Conference on Emerging New World (IECENW-2021)*. 2021:21.
9. What Is Business Intelligence (BI)? IBM: website. Available at: <https://www.ibm.com/think/topics/business-intelligence> (accessed 17.08.2025).
10. Fayyad U., Piatetsky-Shapiro G., Smyth, P. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. *AI Magazine*. 1996;17(3):37. DOI: 10.1609/aimag.v17i3.1230
11. Shuvo S.A., Tabassum M., Tafannum N., Chadni S. Machine Learning in Business Intelligence: From Data Mining to Strategic Insights in MIS. *Review of Applied Science and Technology*. 2025;4:339–369. DOI: 10.63125/dr8py41
12. Arnott D., Shijia G., Lizama F., Meredith R.A., Sont Y. Are business intelligence systems different to decision support systems? In: *Australasian Conference on Information Systems (ACIS)*. 2019:11.
13. Power D.J. Understanding Data-Driven Decision Support Systems. *Information Systems Management*. 2008; 25(2):149–154. DOI: 10.1080/10580530801941124
14. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*. 1986;323:533–536. DOI: 10.1038/323533a0
15. Moody J.E., Darken C.J. Fast Learning in Networks of Locally-Tuned Processing Units. *Neural Computation*. 1989;1(2):281–294. DOI: 10.1162/neco.1989.1.2.281
16. LeCun Y., Boser B., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard W., Jackel L.D. Handwritten Digit Recognition with a Back-Propagation Network. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 1989;2:396–404.
17. West D. Neural network credit scoring models. *Computers & Operations Research*. 2000;27(11):1131–1152. DOI: 10.1016/S0305-0548(99)00149-5
18. Zhou H., Lange K., Suchard M.A. Graphics Processing Units and High-Dimensional Optimization. *Statistical Science*. 2010; 25(3):311–324. DOI: 10.1214/10-STS336
19. Bhattacharyya S., Jha S., Tharakunnel K., Westland J.C. Data mining for credit card fraud: A comparative study. *Decision Support Systems*. 2011;50:602–613. DOI: 10.1016/j.dss.2010.08.008
20. Kozodoi N., Zinovyeva E., Valentin S., Pereira J., Agundez R. Probabilistic Demand Forecasting with Graph Neural Networks. *Arxiv preprint arXiv:2401.13096*. 2024:17.
21. Liu J., Zhang Y., Wang X., Deng Y., Wu X. Dynamic Pricing on E-commerce Platform with Deep Reinforcement Learning: A Field Experiment. *arXiv:1912.02572v3*. 2019:9.
22. Covington P., Adams J., Sargin E. Deep Neural Networks for YouTube Recommendations. In: *Proceedings of the 10th ACM Conference on Recommender Systems (RecSys '16)*. 2016;9.
23. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. *arXiv:1301.3781*. 2013:12.
24. Sutskever I., Vinyals O., Le Q.V. Sequence to Sequence Learning with Neural Networks. *Advances in neural information processing systems*. 2014;27:9.
25. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention Is All You Need. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017;30:15.
26. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In: *Proceedings of the 2019 conference of the North American chapter of the association for computational linguistics: human language technologies*. 2019;1:16.
27. Liu Y., Ott M., Goyal N., Du J., Joshi M., Chen D., Levy O., Lewis M., Zettlemoyer L., Stoyanov V. RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach. *arXiv preprint arXiv:1907.11692*. 2019:10.
28. Warner B., Chaffin A., Clavié B., Weller O., Hallström O., Taghadouini S., Gallagher A., Biswas R., Ladhak F., Aarsen T., Cooper N., Adams G., Howard J., Poli I. Smarter, Better, Faster, Longer: A Modern Bidirectional Encoder for Fast, Memory Efficient, and Long Context Finetuning and Inference. *arXiv preprint arXiv:2412.13663*. 2024:20.
29. Yu S., Chen Y., Zaidi H. AVA: A Financial Service Chatbot based on Deep Bidirectional Transformers. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*. 2021;7:604842. DOI: 10.3389/fams.2021.604842
30. Kim A.G., Yoon S. Corporate Bankruptcy Prediction with Domain – Adapted BERT. *arXiv preprint arXiv:2312.03194*. 2023:11.

31. Radford A., Narasimhan K., Salimans T., Sutskever I. Improving Language Understanding by Generative Pre-Training. *OpenAI Preprint*. 2018:12.
32. Radford A., Wu J., Child R., Luan D., Amodei D., Sutskever I. Language Models are Unsupervised Multitask Learners. *OpenAI blog*. 2019;1(8):9.
33. Brown T., Mann B., Ryder N., Subbiah M., Kaplan J.D., Dhariwal P., Neelakantan A., Shyam P., Sastry G., Askell A., Agarwal S. Language Models are Few-Shot Learners. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020;33:1877–1901.
34. Cheung M. A Reality check of the benefits of LLM in business. *arXiv preprint arXiv:2406.10249*. 2024:20.
35. Rezkallah R., Temam A.M., Lhadj L.S., Dania A.A. Leveraging Large Language Models for business processes: A focus on Customer Service. *Final Year Project Report for École Nationale Supérieure d'Informatique*. 2025:149.
36. Ji Z., Lee N., Frieske R., Yu T., Su D., Xu Y., Ishii E., Bang Y.J., Madotto A., Fung P. Survey of Hallucination in Natural Language Generation. *ACM computing surveys*. 2022;55(12):1–38.
37. Ayyamperumal S.G., Ge L. Current state of LLM Risks and AIGuardrails. *arXiv preprint arXiv:2406.12934*. 2024:9.
38. Du H., Liu S., Zheng L., Cao Y., Nakamura A., Chen L. Privacy in Fine-tuning Large Language Models: Attacks, Defenses, and Future Directions. *Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2024:19.
39. Sun J., Mei C., Wei L., Zheng K., Liu N., Cui M., Li T. Dial-insight: Fine-tuning Large Language Models with High-Quality Domain-Specific Data Preventing Capability Collapse. *arXiv preprint arXiv:2403.09167*. 2024:10.
40. Lermen S., Rogers-Smith C., Ladish J. LoRA Fine tuning Efficiently Undoes Safety Training in Llama 2-Chat 70B, *arXiv preprint arXiv:2310.20624*. 2023:11.
41. Lewis P., Perez E., Piktus A., Petroni F., Karpukhin V., Goyal N., Küttler H., Lewis M., Yih W.T., Rocktäschel T., Riedel S. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020;33:9459–9474.
42. Barnett S., Kurniawan S., Thudumu S., Brannelly Z., Abdelrazek M. Seven Failure Points When Engineering a Retrieval Augmented Generation System. In: *Proceedings of the IEEE. ACM 3rd International Conference on AI Engineering-Software Engineering for AI*. 2024:194–199.
43. Shen M., Umar M., Maeng K., Suh G.E., Gupta U. Towards Understanding Systems Trade-offs in Retrieval-Augmented Generation Model Inference. *arXiv preprint arXiv:2412.11854*. 2024:4.
44. Arslan M., Munawar S., Cruz C. Business insights using RAG-LLMs: a review and case study. *Journal of Decision Systems*. 2024:30. DOI: 10.1080/12460125.2024.2410040
45. Chan C.M., Chen W., Su Y., Yu J., Xue W., Zhang S., Fu J., Liu, Z. Chateval: Towards better llmbased evaluators through multi-agent debate. *arXiv preprint arXiv:2308.07201*. 2023:16.
46. Zheng L., Chiang W.L., Sheng Y., Zhuang S., Wu Z., Zhuang Y., Lin Z., Li Z., Li D., Xing E., Zhang H. Judging llmasajudge with mtbench and chatbot arena. *Advances in neural information processing systems*. 2023;36.
47. Shi L., Ma C., Liang W., Diao X., Ma W., Vosoughi, S. Judging the Judges: A Systematic Study of Position Bias in LLM-as-a-Judge. *arXiv preprint arXiv:2406.07791*. 2025:22.
48. Wataoka K., Takahashi T., Ri R. Self-preference bias in llm-as-a-judge. *arXiv preprint arXiv:2410.21819*. 2025:11.
49. Atil B., Aykent S., Chittams A., Fu L., Passonneau R.J., Radcliffe E., Rajagopal G.R., Sloan A., TudrejT., Ture F., Wu Z. Non-Determinism of “Deterministic” LLM Settings. *arXiv preprint arXiv:2408.04667*. 2025:15.
50. Liu Y., Iter D., Xu Y., Wang S., Xu R., Zhu C. G-EVAL: NLG Evaluation using GPT-4 with Better Human Alignment. In: *Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*. 2023:2511–2522.
51. Muller S., Loison A., Omrani B., Viaud G. Grouse: A benchmark to evaluate evaluators in grounded question answering. *arXiv preprint arXiv:2409.06595*. 2024:25.
52. Abeyasinghe B., Circi R. The Challenges of Evaluating LLM Applications: An Analysis of Automated, Human, and LLM-Based Approaches. *arXiv preprint arXiv:2406.03339*. 2025:15.

53. Modarressi A., Deilamsalehy H., Dernoncourt F., Bui T., Rossi R. A., Yoon, S., Schütze H. NoLiMa: Long-Context Evaluation Beyond Literal Matching. *arXiv preprint arXiv:2502.05167*. 2025:17.
54. Viswanathan G., Samdani G., Dixit Y. AI Agents. *International Journal of Advanced Information Technology*. 2025;15(1/2):9–17.
55. Hou X., Zhao Y., Wang S., Wang H. Model Context Protocol (MCP): Landscape, Security Threats, and Future Research Directions. *arXiv preprint arXiv:2503.23278*. 2025:37.
56. Pajo P. Comprehensive Analysis of Google's Agent2Agent (A2A) Protocol: Technical Architecture, Enterprise Use Cases, and Long-Term Implications for AI Collaboration. 2025:5. DOI: 10.13140/RG.2.2.32649.56164
57. Krishnan N. AI Agents: Evolution, Architecture, and Real-World Applications. *arXiv preprint arXiv: 2503.12687*. 2025:52.
58. Meske C., Hermanns T., von der Weiden E., Loser K.U., Berger, T. Vibe Coding as a Reconfiguration of Intent Mediation in Software Development: Definition, Implications, and Research Agenda. *arXiv preprint arXiv:2507.21928*. 2025:17.
59. OpenAI. GPT-5 System Card. 2025:60.
60. Liu X., Xu N., Chen M., Xiao, C. AutoDAN: Generating Stealthy Jailbreak Prompts on Aligned Large Language Models. *arXiv preprint arXiv:2310.04451*. 2023:21.
61. Tallarita R. AI is Testing the Limits of Corporate Governance, Insights You Need from Harvard Business Review: A Year in Tech 2025. Harvard Business Review Press, 2025:53–71.
62. Wang Z., Bi B., Pentyla S.K., Ramnath K., Chaudhuri S., Mehrotra S., Asur S. A Comprehensive Survey of LLM Alignment Techniques: RLHF, RLAIIF, PPO, DPO and More. *arXiv preprint arXiv: 2407.16216*. 2024:37.
63. Mayer H., Yee L., Chui M., Roberts R. Superagency in the workplace: Empowering people to unlock AI's full potential. McKinsey Company, 2025.
64. Bombalier J. The Competitive Advantage of Using AI in Business. FIU College of Business – Graduate Insights.
65. Tang B.J., Sun K., Curran N.T., Schaub F., Shin K.G. GenAI Advertising: Risks of Personalizing Ads with LLMs. *arXiv preprint arXiv: 2409.15436*. 2024:28.
66. Kumar S. Incorporating Ads into Large Language Models Outputs. *Sumit's Diary (Blog)*. 2024.
67. Fried I. OpenAI looks at chatbot ads. *Axios*. 2024.
68. Steinberg B. AI recruiting is all the rage. *New York Post*. 2025.
69. Webb A. *How to Prepare for a Gen AI Future You Can't Predict*. Insights You Need from Harvard Business Review: A Year in Tech 2025. Harvard Business Review Press, 2025:155–169.

### Информация об авторах

**Шинкарев Александр Андреевич**, канд. техн. наук, доц. кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; sania.kill@mail.ru.

**Ядрышников Мария Викторовна**, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; reeyardma@gmail.com.

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

**Лазарева Снежана Андреевна**, выпускник кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; lazarevas124@gmail.com.

**Губин Владимир Михайлович**, студент кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; teacfoou@gmail.com.

***Information about the authors***

**Alexander A. Shinkarev**, Cand. Sci (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; sania.kill@mail.ru.

**Maria V. Yadryshnikova**, Postgraduate Student of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; reeyardma@gmail.com.

**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.

**Snezhana A. Lazareva**, Graduate of the Department of Systems Programming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; lazarevas124@gmail.com.

**Vladimir M. Gubin**, Student of the Department of Systems Programming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; teacfoou@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 18.08.2025***

***The article was submitted 18.08.2025***

# Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья  
УДК 004.896 + 004.4  
DOI: 10.14529/ctcr250403

## ИНТЕРФЕЙС Х3D-ПРОТОТИПА СХВАТА МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА

**А.И. Телегин**<sup>1</sup>, [teleginai@susu.ru](mailto:teleginai@susu.ru)

**Г.И. Волович**<sup>2</sup>, [g\\_volovich@mail.ru](mailto:g_volovich@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>

**Е.В. Гусев**<sup>3</sup>, [gusev@susu.ru](mailto:gusev@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8458-1222>

**С.Г. Пудовкина**<sup>1</sup>, [pudovkinasg@susu.ru](mailto:pudovkinasg@susu.ru)

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия

<sup>2</sup> ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия

<sup>3</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Целью является разработка интерфейсной части Х3D-прототипа двухпальцевого схвата манипуляционных роботов для симуляции его функционирования при выполнении различных технологических операций, например, перехода из положения захвата детали в положение его освобождения в рабочей зоне станка с ЧПУ. **Методы исследования** относятся к трехмерному моделированию, системному анализу и робототехнике. **Результаты исследования** содержат описание интерфейсной части кода Х3D-прототипа схвата, у которого в качестве координат полюса могут выступать декартовы, цилиндрические, сферические, ангулярные или обобщенные координаты и ориентация схвата может описываться параметрами Эйлера, тремя углами (Эйлера, самолетными, корабельными), кватернионами, параметрами Кейли – Клейна. Конечные перемещения схвата могут задаваться винтами, бикватернионами или любыми комбинациями параметров, описывающих целевое положение полюса схвата и его ориентацию. В процессах переходов схвата из одной осевой ориентации в другую могут использоваться не только известные параметры, но и уникальные цифровые коды. Исследованы групповые свойства таких кодов, установлена их связь с параметрами Эйлера и кватернионами. Предоставлена возможность использования любых способов описания положений схвата. **Заключение.** Полученные результаты используются для Х3D-моделирования схвата в цифровой модели манипуляционного робота, входящего в состав роботизированного технологического комплекса, в котором известны технологическое оборудование, а также количество, внешние виды, массо-инерционные и физические свойства объектов манипулирования (грузов, деталей, инструмента), т. е. адаптивных свойств разработанный прототип схвата не имеет.

**Ключевые слова:** XML, Х3D, прототипирование, конечные группы, подгруппы, параметры Эйлера, кватернионы, анимация

**Для цитирования:** Интерфейс Х3D-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

## INTERFACE OF THE X3D PROTOTYPE OF THE MANIPULATIVE ROBOT GRIP

**A.I. Telegin**<sup>1</sup>, [teleginai@susu.ru](mailto:teleginai@susu.ru)

**G.I. Volovich**<sup>2</sup>, [g\\_volovich@mail.ru](mailto:g_volovich@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3572-1823>

**E.V. Gusev**<sup>3</sup>, [gusevev@susu.ru](mailto:gusevev@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8458-1222>

**S.G. Pudovkina**<sup>1</sup>, [pudovkinasg@susu.ru](mailto:pudovkinasg@susu.ru)

<sup>1</sup> South Ural State University, Miass, Russia

<sup>2</sup> LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia

<sup>3</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The goal is to develop the X3D interface part, a prototype of a two-finger grip for manipulative robots to simulate its operation during various technological operations, for example, moving from the position of gripping a part to the position of releasing it in the working area of a numerically controlled machines. The research methods relate to three-dimensional modeling, system analysis and robotics. The results of the research contain a description of the interface part and the X3D prototype code of the grip, in which Cartesian, cylindrical, spherical, angular or generalized coordinates can act as pole coordinates, and the orientation of the grip can be described by Euler parameters, three angles (Euler, airplane, ship), quaternions, and Cayley-Klein parameters. The final movements of the grip can be set by screws, biquaternions, or any combination of parameters describing the target position of the grip pole and its orientation. In the processes of grip transitions from one axial orientation to another, not only known parameters can be used, but also unique digital codes. The group properties of such codes are investigated, and their relationship with Euler parameters and quaternions is established. It is possible to use any methods of describing the positions of the grip. **Conclusion.** The obtained results are used for X3D modeling of the grip in a digital model of a manipulative robot, which is part of a robotic technological complex in which the technological equipment is known, as well as the number, appearance, mass-inertia and physical properties of objects of manipulation (loads, parts, tools), i.e. adaptive properties, the developed prototype of the grip does not it has.

**Keywords:** XML, X3D, prototyping, finite groups, subgroups, Euler parameters, quaternions, animation

**For citation:** 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

### Введение

Различные типы захватных устройств (механические, вакуумные, магнитные и прочие) Манипуляционных Роботов (МР) служат для захватывания и удержания объектов манипулирования (грузов), которые могут иметь различную геометрию, размеры, массу и другие параметры. Поэтому их относят к сменным устройствам, которые часто приходится проектировать под решение конкретных задач захвата и удержания различных грузов [1–3]. Схватом называется устройство захвата, представляющее собой механизм, удерживающий груз посредством его зажима рабочими элементами под действием привода [4]. В качестве рабочих элементов в схватах часто выступают два пальца.

Настоящая работа является развитием статьи [5] и содержит результаты исследования возможностей трехмерного графического моделирования управляемых систем тел в Программной Системе (ПС) «СисТел», где используются XML-ориентированный расширяемый язык разметки виртуальных миров X3D и возможности его расширения вплоть до создания собственных (предметно ориентированных) декларативных языков разметки информации путем X3D-прототипирования [6].

Анализ отличий ПС «СисТел» от зарубежных аналогов начат в статье [5]. Первое из них связано с предметной ориентацией ПС «СисТел» и способом расширения функциональных возможностей этой ПС. Сущность этого способа связана с использованием ранее введенных прототипов в прототипировании более сложных систем. Здесь, например, в прототипировании схвата используются прототипы тел, описанные в статье [5].



В ПС, предназначенных для цифрового моделирования систем тел, важно обеспечить несколько свойств. Во-первых, от пользователя не требовать знаний информационных технологий, используемых при создании и функционировании ПС. Пользователь должен знать предметную область, для моделирования которой используется ПС. Во-вторых, подготовка входной информации должна быть простой и на точность моделирования должна влиять только точность входных данных. Например, на точность построения программных движений тел МР должна влиять только точность задания постоянных межполюсных расстояний (длин тел), исходных и целевых значений обобщенных координат, их скоростей и т. д. В-третьих, разрабатываемая ПС должна иметь потенциал своего аддитивного развития (увеличения своего функционала без пересмотра основ). В-четвертых, функционал ПС должен обеспечивать эффективное решение задач механики, управления и синтеза МР с заданными кинематическими, статическими и динамическими свойствами. В-пятых, для описания состояний управляемых систем тел желательно иметь возможность использовать не только известные параметры, но и новые параметры, если, конечно, установлена их связь с известными параметрами. Например, для описания положений полюсов тел желательно предоставить возможность использовать не только декартовы, цилиндрические или сферические координаты, но и обобщенные координаты. Для описания ориентаций тел желательно предоставить возможность использовать не только известные, но и новые (уникальные) параметры. Другие не менее важные свойства ПС, например, удобный интерфейс с пользователем, гибкость, доступность и т. д., в целом больше относятся к коммерческим версиям ПС, чем к его прототипу. Поэтому эти свойства здесь не рассматриваются.

В части методики моделирования тел МР, описанной в статье [5], два первых свойства ПС «СисТел» обеспечены (реализованы), так как пользователю достаточно уметь составлять цифровые коды моделей тел. Для обеспечения третьего свойства ПС геометрические размеры графических объектов, используемых в моделях тел, реализуются через поля Узла Трансформации (УТ), имеющие произвольный тип доступа (`accessType = "inputOutput"`), а не через поля размеров графического объекта, у которых `accessType = "initialiseOnly"` [5]. Четвертое свойство предметно-ориентированной линейки ПС «СисТел» («СисТелСхват», «СисТелМР», «СисТелРТК», «СисТелГПС», «СисТелША», «СисТелШМ») реализуется в тех границах запланированного развития их функциональных возможностей, которые обеспечивают методы теоретической механики систем тел, опубликованные в работах [7, 8]. Реализация пятого свойства ПС «СисТел» продемонстрирована в настоящей статье. В этой связи рекомендуем обратить внимание на статью [9], где для моделирования роботизированных технологических комплексов и гибких производственных систем используются группы, их подгруппы, алгебра полиномов, математическая теория категорий и другие математические методы.

Во многих техпроцессах известны не только целевые ориентации схвата, инструмента, обрабатываемых тел и т. д., но их ориентации направлены вдоль взаимно перпендикулярных осей. Учет этих особенностей упрощает роботизацию таких техпроцессов [9].

**Постановка задачи.** Разработать и описать интерфейсную часть Х3D-прототипа схвата, позволяющую использовать любые известные параметры положения полюса схвата и его ориентации, а также вводить в обращение новые параметры, если установлена их связь с декартовыми координатами полюса схвата и параметрами Эйлера его ориентации.

### 1. Осевые ориентации схвата

Модель схвата изображена на рис. 1, где С – полюс схвата; 1 – кисть; 2 – большой палец. На рис. 2 изображена модель ориентирующего пространства в виде сферы, разбитой с помощью правого репера  $\overline{x}\overline{y}\overline{z}$  на восемь октант [10], где для первой из них орт  $\overline{x}$  направлен горизонтально вправо, орт  $\overline{y}$  – вертикально вверх. Осевой Ориентацией Схвата (ООС) назовем такую его ориентацию, в которой орты  $\overline{x}_c$ ,  $\overline{y}_c$  схвата (см. рис. 1) направлены вдоль или навстречу орт репера  $\overline{x}\overline{y}\overline{z}$ , совмещённых с рёбрами октант. Наша ближайшая цель – сопоставить ООС с ориентациями репера  $\overline{x}\overline{y}\overline{z}$ , в которых его орты направлены вдоль рёбер октант.

Закодируем ООС цифровым кодом  $ij$ , где первое число  $i \in \{1, 2, \dots, 6\}$  кодирует направления орта  $\overline{x}_c$ : 1 – горизонтально вправо, 2 – влево, 3 – вертикально вверх, 4 – вниз, 5 – на нас, 6 – от нас. Аналогично второе число  $j \in \{1, 2, \dots, 6\}$  кодирует направление орта  $\overline{y}_c$ . Заметим, что для каждого из шести осевых ориентаций орта  $\overline{x}_c$  возможны только четыре ориентации орта  $\overline{y}_c$ . Таким об-

разом, имеем всего  $6 \cdot 4 = 24$  ООС. Например, если орт  $\bar{x}_c$  направлен на нас ( $i = 5$ ), то орт  $\bar{y}_c$  может быть ориентирован только вправо ( $j = 1$ ) или влево ( $j = 2$ ), а также вверх ( $j = 3$ ) или вниз ( $j = 4$ ), т. е. в случае  $i = 5$  возможны следующие коды  $5j$  ООС – 51, 52, 53, 54. Аналогично кодируются остальные ООС. Обозначим ООС, соответствующую коду  $ij$ , через  $OC(ij)$  и для словесного (вербального) описания этого обозначения поставим ему в соответствие следующие фразы:  $OC(13)$  – пальцы вправо, большой вверх;  $OC(42)$  – пальцы вниз, большой влево;  $OC(53)$  – пальцы на нас, большой вверх и т. д.

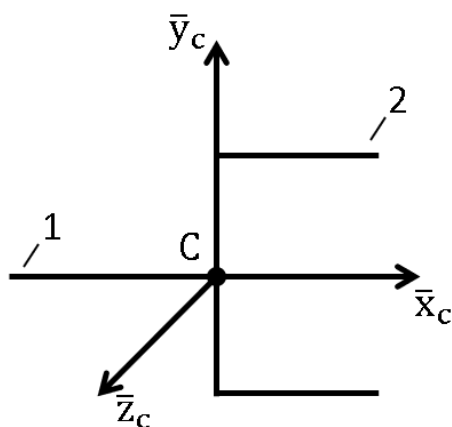


Рис. 1. Модель схвата  
Fig. 1. Capture model

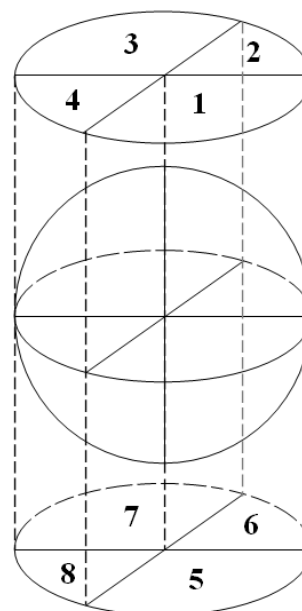


Рис. 2. Модель ориентационного пространства  
Fig. 2. Orientation space model

Для визуального (графического) описания ООС построим таблицу из восьми столбцов (по числу октант) и трёх строк, соответствующих трём возможным ООС в каждом октанте (по числу круговых перестановок имён орт –  $xuz$ ,  $zux$ ,  $uzx$ ). Обозначим Таблицу ООС через ТОС. Прежде чем заполнить ТОС, напомним [5], что в Х3Д для ориентации графического объекта относительно Системы Координат Х3Д-сцены (СКС) используются Параметры Эйлера (ПЭ)  $c_x, c_y, c_z, q$ , являющиеся значением поля rotation узла трансформации, который вложен в узел сцены и содержит разметку объекта, например, схвата. Наша цель – записать в нижней части каждой ячейки ТОС ПЭ перехода от  $OC(13)$  к  $OC(ij)$ .

Заполним ТОС за три этапа. На первом в центре ячеек каждого столбца изобразим грани соответствующих октант. Направление граней очевидно из рис. 2.

На втором этапе мысленно придадим граням имена ( $x, y, z$ ). Репер первой ячейки (левая верхняя) должен соответствовать реперу СКС, где орт  $\bar{x}$  направлен вправо, орт  $\bar{y}$  – вверх, что соответствует  $OC(13)$ , код которой на третьем этапе запишем в левом верхнем углу первой ячейки первой строки ТОС. Реперы в следующих семи ячейках первой строки ТОС получим путём сохранения ориентации одного орта предшествующего репера, где имя этого орта будем менять круговой перестановкой имен  $x, y, z$ . Так, во второй ячейке первой строки орт  $\bar{x}$  сохраняет свою ориентацию (вправо) и для перехода во второй октант орт  $\bar{y}$  должен принять ориентацию «от нас», что соответствует  $OC(16)$ . Для этого необходимо повернуть репер из первой ячейки вокруг оси  $O\bar{x}$  ( $O$  – центр шара на рис. 2) на 270 градусов (или на «-90» градусов), что соответствует ПЭ =  $(1, 0, 0, -\pi/2)$ , который записан в нижней части второй ячейки ТОС. Здесь и далее при записи ПЭ используется положительное значение угла поворота вокруг выбранной оси, например, вместо «-90» градусов записываем 270°. Значения ПЭ в остальных ячейках будут приведены позже. Здесь же, действуя аналогично, дойдем до последней ячейки первой строки ТОС. Реперы в ячейках второй и третьей строки каждого столбца получим из репера в первой строке этого столбца путём круговой перестановки имен  $x, y, z$ .

На третьем этапе в каждой ячейке изобразим ООС по следующему правилу: пальцы направим вдоль орта  $\bar{x}$  и большой палец должен располагаться рядом со стрелкой.

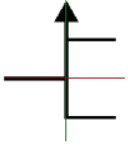
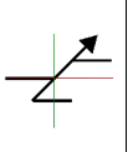
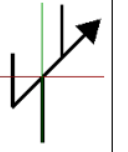

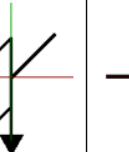
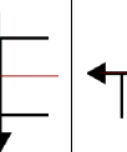
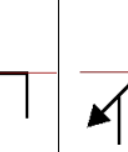
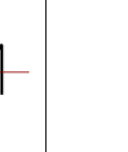
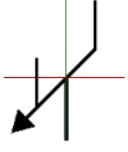
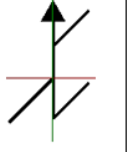
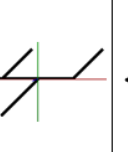
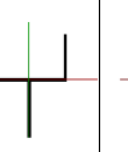
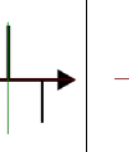
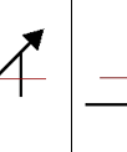
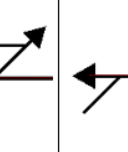
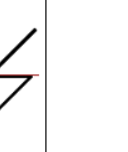



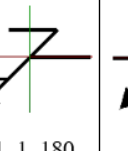
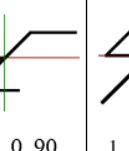
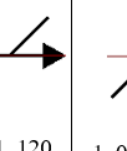
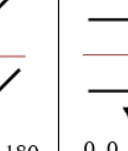
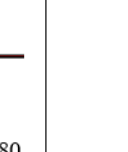
Итоговая ТОС, где в ячейках размещены 2D-виды схвата на рис. 1 (без обозначений полюса, орт и номеров деталей), представлена в табл. 1. ОС(13) с соответствующим ПЭ = (1, 0, 0, 0) будем называть исходной ООС. Она расположена в левом верхнем углу ТОС.

Возможные осевые ориентации схвата (ООС) манипулятора

Таблица 1

Table 1

Possible axial orientations of the manipulator grip

1	2	3	4	5	6	7	8
13  1, 0, 0, 0	16  1, 0, 0, 270	36  -1, -1, 1, 120	53  0, 1, 0, 270	54  1, 0, 1, 180	14  1, 0, 0, 180	42  1, -1, 0, 180	45  1, -1, -1, 120
35  1, 1, 1, 120	63  0, 1, 0, 90	62  1, -1, -1, 240	32  0, 0, 1, 90	41  0, 0, 1, 270	46  -1, 1, -1, 240	26  0, 1, -1, 180	52  1, -1, 1, 120
51  -1, -1, -1, 120	31  -1, -1, 0, 180	23  0, 1, 0, 180	25  0, 1, 1, 180	15  1, 0, 0, 90	61  1, 1, -1, 120	64  1, 0, -1, 180	24  0, 0, 1, 180

Описанный процесс построения ТОС упростил разбиение множества ООС на классы. Если данное множество разбито на попарно непересекающиеся подмножества, дающие в сумме само множество, и элементы каждого подмножества связаны некоторым отношением эквивалентности, обладающим свойствами симметрии, транзитивности и рефлексивности, то для краткости говорят просто о разбиении множества на классы [11]. Будем считать ООС эквивалентными, если они получаются из ОС(13) путем поворота вокруг заданной неподвижной оси, т. е. сохраняют эту ось неподвижной. Очевидно, что ООС с кодами 13, 15, 14, 16 являются эквивалентными, так как они сохраняют неподвижной ось  $O\bar{x}$  (первое число каждого кода равно единице). Поэтому в этих ячейках ПЭ = (1, 0, 0,  $q$ ), где  $q \in \{0, 90, 180, 270\}$ . Из ТОС видно, что пальцы схвата в ячейках с кодами 13, 15, 14, 16 направлены вправо. Обозначим этот класс через  $G_x$ . Аналогично элементы класса  $G_y = \{63, 23, 53\}$  сохраняют неподвижной ось  $O\bar{y}$ , т. е. большой палец схвата в ячейках с кодами 63, 23, 53 направлен вверх и ПЭ = (0, 1, 0,  $q$ ), где  $q \in \{90, 180, 270\}$ . Легко проверить, что класс  $G_z = \{32, 24, 41\}$  сохраняет неподвижной ось  $O\bar{z}$ , т. е. ПЭ = (0, 0, 1,  $q$ ), где  $q \in \{90, 180, 270\}$ . Действительно, из ТОС видно, что орт  $\bar{z}_c$  схвата в ячейках с кодами 32, 24, 41 направлен на нас.

## 2. Осевые группы $G_x$ , $G_y$ , $G_z$ и их циклические подгруппы

Покажем, что элементы класса  $G_x$ , т. е. коды 13, 15, 14, 16, образуют группу, которую обозначим через  $G_x$ . Для этого построим таблицу умножения этих кодов. Групповую операцию обозначим символом «\*» и введем ее следующим образом. Умножить два кода – значит последовательно выполнить им соответствующие повороты один за другим. При этом будем считать совпадающими два поворота, отличающиеся друг от друга на целое число полных оборотов ( $360^\circ$ ).

ОС(13) примем за групповую единицу. Это значит, что коду 13 ставится в соответствие поворот схвата на  $0^\circ$  или  $360^\circ$  (тождественный поворот) вокруг оси  $C\bar{X}$ . Код 15 означает поворот схвата из ОС(13) на  $90^\circ$  вокруг оси  $C\bar{X}$ . Коды 14 и 16 означают такие повороты на  $180^\circ$  и  $270^\circ$  соответственно.

Очевидно, что для кодов 13, 15, 14, 16 верны следующие операции умножения:

$$\begin{aligned} 13 * 13 &= 0^\circ * 0^\circ = 0^\circ = 13; & 13 * 15 &= 0^\circ * 90^\circ = 90^\circ = 15; & 13 * 14 &= 14; & 13 * 16 &= 16; \\ 15 * 15 &= 90^\circ * 90^\circ = 180^\circ = 14; & 15 * 14 &= 90^\circ * 180^\circ = 270^\circ = 16; \\ 15 * 16 &= 90^\circ * 270^\circ = 360^\circ = 0^\circ = 13; & 14 * 14 &= 180^\circ * 180^\circ = 0^\circ = 13; \\ 14 * 16 &= 180^\circ * 270^\circ = 360^\circ * 90^\circ = 0^\circ * 90^\circ = 90^\circ = 15; \\ 16 * 16 &= 270^\circ * 270^\circ = 360^\circ * 180^\circ = 180^\circ * 0^\circ = 180^\circ = 14. \end{aligned}$$

Следовательно, табл. 2 является таблицей умножения группы  $G_x$ .

Из табл. 2 видно, что группа  $G_x$  абелева (коммутативная). Например,  $13 * 15 = 15 * 13$ ,  $14 * 15 = 15 * 14$  и т. д. Каждому элементу группы  $G_x$  соответствует обратный ему элемент. Например,  $15 * 16 = 13$ , т. е.  $15^{-1} = 16$ , так как по определению, если  $ij * ij^{-1} = 13$ , где 13 – единица (нейтральный элемент) группы, то  $ij^{-1}$  – элемент группы, обратный элементу  $ij$ .

Покажем, что группа  $G_x$  имеет циклические подгруппы. Напомним, что циклическая подгруппа – это подмножество группы, порождённое одним элементом и содержащее все его степени относительно заданной операции умножения. Например,  $H(15)$  – циклическая подгруппа 4-го порядка группы  $G_x$ , порожденная ОС(15). Действительно, если элементы подгруппы  $H(15)$  обозначить через  $a_k$ , то по определению  $a_0 = 13 = 15^0$  и далее

$$\begin{aligned} a_1 &= 15^0 * 15 = 13 * 15 = 15 = 15^1; \\ a_2 &= a_1 * 15 = a_1 * a_1 = 15^1 * 15^1 = 15^2 = 15 * 15 = 14; \\ a_3 &= a_2 * 15 = a_2 * a_1 = 15^2 * 15 = 15^3 = 14 * 15 = 16; \\ a_4 &= a_3 * 15 = a_3 * a_1 = 15^3 * 15 = 15^4 = 16 * 15 = 13 = a_0. \end{aligned}$$

Следовательно, с учетом равенств

$$\begin{aligned} a_3 * a_1 &= a_4 = a_0; & a_2 * a_2 &= a_2 * a_1 * a_1 = a_3 * a_1 = a_4 = a_0; \\ a_2 * a_3 &= a_2 * a_1 * a_1 * a_1 = a_4 * a_1 = a_0 * a_1 = a_1 \end{aligned}$$

получим, что табл. 3 является таблицей умножения группы  $H(15)$ .

Таблица 2  
Таблица умножения  
группы  $G_x$   
Table 2  
Multiplication table  
of the  $G_x$  group

	13	15	14	16
13	13	15	14	16
15	15	14	16	13
14	14	16	13	15
16	16	13	15	14

Таблица 3  
Таблица умножения  
циклической подгруппы  $H(15)$   
Table 3  
Multiplication table  
of the cyclic subgroup  $H(15)$

	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
$a_0$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_0$
$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_0$	$a_1$
$a_3$	$a_3$	$a_0$	$a_1$	$a_2$

Аналогично, считая ОС(1j) образующим элементом группы  $H(1j)$  для  $j = 16$  и  $j = 14$ , получим еще две циклические подгруппы группы  $G_x$ .  $H(16)$  – циклическая подгруппа 4-го порядка группы  $G_x$ , порожденная ОС(16), где

$$\begin{aligned} b_0 &= 13 = 16^0; & b_1 &= 16^0 * 16 = 16^1; \\ b_2 &= b_1 * 16 = b_1 * b_1 = 16 * 16 = 16^2 = 14; \\ b_3 &= b_2 * 16 = b_2 * b_1 = 16^2 * 16 = 16^3 = 14 * 16 = 15; \\ b_4 &= b_3 * 16 = b_3 * b_1 = 16^3 * 16 = 16^4 = 15 * 16 = 13 = b_0 \end{aligned}$$

и табл. 4 представляет таблицу умножения подгруппы  $H(16)$ .  $H(14)$  – циклическая подгруппа 2-го порядка группы  $G_x$ , порожденная ОС(14), где

$$c_0 = 13 = 14^0; & c_1 = 14^0 * 14 = 14^1; & c_2 = c_1 * 14 = c_1 * c_1 = 14 * 14 = 14^2 = 13 = c_0$$

и табл. 5 представляет таблицу умножения подгруппы  $H(14)$ .

Таблица 4  
Таблица умножения  
циклической подгруппы H(16)  
Table 4  
Multiplication table  
of the cyclic subgroup H(16)

	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
$b_0$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
$b_1$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_0$
$b_2$	$b_2$	$b_3$	$b_0$	$b_1$
$b_3$	$b_3$	$b_0$	$b_1$	$b_2$

Таблица 5  
Таблица умножения  
циклической подгруппы H(14)  
Table 5  
Multiplication table  
of the cyclic subgroup H(14)

	$c_0$	$c_1$
$c_0$	$c_0$	$c_1$
$c_1$	$c_1$	$c_0$

Группы  $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$  изоморфны, где взаимно однозначные соответствия элементов имеют вид  $15 \leftrightarrow 63 \leftrightarrow 32$ ,  $14 \leftrightarrow 23 \leftrightarrow 24$ ,  $16 \leftrightarrow 53 \leftrightarrow 41$ .

Эти группы имеют одинаковую структуру и свойства, несмотря на разные обозначения элементов. В них код 13 является единичным элементом, который оставляет другие элементы групп неизменными при умножении. Таблицы умножения для этих групп имеют одинаковый вид, если заменить соответствующие коды. Например, в  $G_x$   $15 * 16 = 13$ , точно так же в  $G_y$   $63 * 53 = 13$ , а в  $G_z$   $32 * 41 = 13$  и так далее. Таким образом, таблицы умножения для групп  $G_y$  и  $G_z$  имеют виды табл. 6 и 7.

Таблица 6  
Таблица умножения  
группы  $G_y$   
Table 6  
Multiplication table  
of the  $G_y$  group

	13	63	23	53
13	13	63	23	53
63	63	23	53	13
23	23	53	13	63
53	53	13	63	23

Таблица 7  
Таблица умножения  
группы  $G_z$   
Table 7  
Multiplication table  
of the  $G_z$  group

	13	32	24	41
13	13	32	24	41
32	32	24	41	13
24	24	41	13	32
41	41	13	32	24

Легко проверить, что группы  $G_y$ ,  $G_z$  имеют циклические подгруппы. Напомним, что группы  $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$  изоморфны. Соответственно, и их циклические подгруппы будут аналогичны  $G_x$ . Из этого следует, что

H(63) – циклическая подгруппа 4-го порядка группы  $G_y$ , порожденная ОС(63);

H(53) – циклическая подгруппа 4-го порядка группы  $G_y$ , порожденная ОС(53);

H(23) – циклическая подгруппа 2-го порядка группы  $G_y$ , порожденная ОС(23);

H(32) – циклическая подгруппа 4-го порядка группы  $G_z$ , порожденная ОС(32);

H(41) – циклическая подгруппа 4-го порядка группы  $G_z$ , порожденная ОС(41);

H(24) – циклическая подгруппа 2-го порядка группы  $G_z$ , порожденная ОС(24).

Более того, 24 ООС образуют группу, изоморфную группе поворотов (самосовмещений) куба. Самое простое описание всех самосовмещений куба представлено в популярной книге П.С. Александрова [11]. Это описание можно использовать для выделения оставшихся классов ООС и обоснования значений ПЭ в соответствующих ячейках ТОС. Последнюю цель можно достичь путем использования ПЭ, соответствующих классам  $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$ , и алгебры кватернионов. Реализуем этот путь.

### 3. Кватернионы переходов

Обозначим ПЭ, описывающий переход из ОС(13) в ОС( $ij$ ), через ПЭ( $ij$ ). В конце первого раздела статьи получены следующие значения ПЭ( $ij$ ):

$$\begin{aligned} \text{ПЭ}(13) &= (1, 0, 0, 0); \text{ПЭ}(15) = (1, 0, 0, 90); \text{ПЭ}(14) = (1, 0, 0, 180); \text{ПЭ}(16) = (1, 0, 0, 270); \\ \text{ПЭ}(63) &= (0, 1, 0, 90); \text{ПЭ}(23) = (0, 1, 0, 180); \text{ПЭ}(53) = (0, 1, 0, 270); \\ \text{ПЭ}(32) &= (0, 0, 1, 90); \text{ПЭ}(24) = (0, 0, 1, 180); \text{ПЭ}(41) = (0, 0, 1, 270). \end{aligned} \quad (1)$$

Наша ближайшая цель – вычислить ПЭ остальных ООС и записать их в нижних частях соответствующих ячеек ТОС. Для этого будем использовать кватернионное описание переходов между ООС и алгебру кватернионов.

Компоненты  $q_0, q_x, q_y, q_z$  кватерниона

$$\vec{q} = q_0 + q_x \vec{x} + q_y \vec{y} + q_z \vec{z} \quad (2)$$

связаны с ПЭ  $c_x, c_y, c_z, q$  следующими формулами:

$$q_0 = \cos(q/2); q_\xi = c_\xi \sin(q/2); \xi \in \{x, y, z\}, \quad (3)$$

т. е. преобразование ПЭ в  $\vec{q}$  можно выполнить по формуле

$$\vec{q} = \cos(q/2) + (c_x \vec{x} + c_y \vec{y} + c_z \vec{z}) \sin(q/2), \quad (4)$$

где  $c_x^2 + c_y^2 + c_z^2 = 1$ . Из формул (2), (3) также видно, что преобразование  $\vec{q}$  в ПЭ можно выполнить по формуле

$$(c_x, c_y, c_z, q) = (q_x/s_q, q_y/s_q, q_z/s_q, q), \quad (5)$$

где  $s_q = \sin(q/2)$ ,  $q = 2 \arccos(q_0)$ .

В алгебре кватернионов операция умножения кватернионов определена так, что множество кватернионов с операциями умножения и сложения образуют некоммутативное поле. Из определения кватернионного умножения следуют формулы [12]:

$$\vec{\xi} \circ \vec{\eta} = \vec{\xi} \times \vec{\eta} - \vec{\xi} \cdot \vec{\eta}; a \circ \vec{\xi} = \vec{\xi} \circ a = a\vec{\xi}; a \circ b = ab, \quad (6)$$

т. е. кватернионное произведение двух векторов равно разности их векторного и скалярного произведений, а кватернионное умножение скаляра на вектор или двух скаляров равно обычному умножению скаляра на вектор или, соответственно, двух скаляров.

Введем обозначения:

ПЭ( $ij, kl$ ) – ПЭ, описывающий переход из ОС( $ij$ ) в ОС( $kl$ );

$\vec{q}_{ij}$  – кватернион поворота из ОС(13) в ОС( $ij$ );

$\vec{q}_{ij}^{kl}$  – кватернион поворота из ОС( $ij$ ) в ОС( $kl$ ).

В формуле (2) орты  $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$  образуют репер, относительно которого осуществляется поворот, заданный кватернионом. Если, например, поворот осуществляется из ОС(13), то  $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$  – орты репера СКС. Для кватерниона  $\vec{q}_{ij}^{kl}$  орты  $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$  должны соответствовать ортам  $\vec{x}_c, \vec{y}_c, \vec{z}_c$  схвата в ячейках ТОС с кодом  $ij$  в левом верхнем углу.

Формулы (6) будем использовать для вычисления кватерниона, описывающего сложные переходы. Например, кватернион  $\vec{q}_{36}$  можно вычислить по формуле  $\vec{q}_{36} = \vec{q}_{13}^{16} \circ \vec{q}_{16}^{36}$ .

В общем случае, если известны ПЭ( $ij$ ) и ПЭ( $ij, kl$ ), то вычисление  $\vec{q}_{kl}$  и его преобразование в ПЭ( $kl$ ) можно выполнить по следующему алгоритму (за четыре шага):

1) ПЭ( $ij$ ) по формуле (4) преобразуем в кватернион  $\vec{q}_{ij} = \vec{q}_{13}^{ij}$ ;

2) ПЭ( $ij, kl$ ) по формуле (4) преобразуем в  $\vec{q}_{ij}^{kl}$ ;

3) вычислим по формулам (6)  $\vec{q}_{kl} = \vec{q}_{13}^{ij} \circ \vec{q}_{ij}^{kl}$ ;

4) из  $\vec{q}_{kl}$  найдем  $q_0$  и по формуле  $q = 2 \arccos(q_0)$  вычислим  $q$ . В заключение по формулам (5) получим искомый ПЭ( $kl$ ).

*Замечание.* Отметим, что в ХЗД значением поля rotation УТ, вложенного в сцену, вместо направляющего косинуса оси поворота можно использовать координаты этой оси в СКС.

Вычислим ПЭ(36). Из (1) имеем ПЭ(16) = (1, 0, 0, 270). Из ТОС видно, что ПЭ(16, 36) описывает поворот схвата на 270° вокруг оси  $C\vec{y}_c$ , т. е. ПЭ(16, 36) = (0, 1, 0, 270). Следовательно, по описанному алгоритму получим:

1) из ПЭ(16) = (1, 0, 0, 270) по формуле (4) получим

$$\vec{q}_{13}^{16} = \cos(135) + \vec{x} \sin(135) = -1/\sqrt{2} + \vec{x}/\sqrt{2} = (\vec{x} - 1)/\sqrt{2};$$

2) из ПЭ(16,36) = (0, 1, 0, 270) по формуле (4) получим

$$\vec{q}_{13}^{16} = \cos(135) + \vec{y} \sin(135) = -1/\sqrt{2} + \vec{y}/\sqrt{2} = (\vec{y} - 1)/\sqrt{2};$$

3) по формулам (6) получим

$$\vec{q}_{36} = \vec{q}_{13}^{16} \circ \vec{q}_{16}^{36} = (\bar{x} - 1) \circ (\bar{y} - 1)/2 = (\bar{x} \circ \bar{y} + 1 - \bar{y} - \bar{x})/2 = (1 - \bar{x} - \bar{y} + \bar{z})/2;$$

4) из  $\vec{q}_{36}$  имеем  $q_0 = 1/2$ , т. е.  $q = 2 \arccos(1/2) = 2 \cdot 60 = 120$ . Следовательно, с учетом замечания после умножения компонент кватерниона на 2 получим ПЭ(36) = (-1, -1, 1, 120).

Вычислим ПЭ(54). Из (1) имеем ПЭ(53) = (0, 1, 0, 270). Из ТОС видно, что ПЭ(53, 54) описывает поворот схвата на  $180^\circ$  вокруг оси  $C\bar{x}_c$ , т. е. ПЭ(53, 54) = (1, 0, 0, 180). Следовательно, по описанному алгоритму получим:

1) из ПЭ(53) = (0, 1, 0, 270) по формуле (4) получим

$$\vec{q}_{13}^{53} = \cos(135) + \bar{y} \sin(135) = -1/\sqrt{2} + \bar{y}/\sqrt{2} = -(1 - \bar{y})/\sqrt{2};$$

2) из ПЭ(53,54) = (1, 0, 0, 180) по формуле (4) получим

$$\vec{q}_{53}^{54} = \cos(90) + \bar{x} \sin(90) = \bar{x};$$

3) по формулам (6) получим

$$\vec{q}_{54} = \vec{q}_{13}^{53} \circ \vec{q}_{53}^{54} = -(1 - \bar{y}) \circ \bar{x}/\sqrt{2} = -(\bar{x} - \bar{y} \circ \bar{x})/\sqrt{2} = -(\bar{x} + \bar{z})/\sqrt{2};$$

4) из  $\vec{q}_{54}$  имеем  $q_0 = 0$ , т. е.  $q = 2 \arccos(0) = 2 \cdot 90 = 180$ . Следовательно, с учетом замечания после умножения компонент кватерниона на « $-\sqrt{2}$ » получим ПЭ(54) = (1, 0, 1, 180).

Аналогично вычисляются ПЭ для остальных ООС. Для верификации результатов этих вычислений можно использовать html-код в листинге 1, где ПЭ является значением поля initialDestination. В коде листинга 1 ПЭ = ('1, 0, -1, 3.1415'), что соответствует ОС(64). Этот код работает во всех доступных нам браузерах.

### Листинг 1. Разметка поворотов схвата из ОС(13) в ОС(ij) для соответствующего ПЭ

```
<html><head><script src="x3dom.js"></script></head><body>
<X3D width="800px" height="400px"><Scene>
<Background skyColor="1 1 1"></Background><Viewpoint position="0 0 3"></Viewpoint>
<Transform DEF="схват">
<Transform translation="-0.25 0 0">
<Shape><Box size="0.5 0.15 0.15"></Box>
<Appearance DEF="цвет"><Material diffuseColor="0 0 1"></Material></Appearance>
</Shape></Transform>
<Shape><Box size="0.05 0.8 0.3"></Box><Appearance USE="цвет"></Appearance></Shape>
<Transform translation="0 0.5 0">
<Shape><Box size="0.05 0.2 0.05"></Box>
<Appearance USE="цвет"></Appearance></Shape></Transform>
<Transform translation="0.275, 0.3, 0">
<Shape DEF="Палец"><Box size="0.5 0.05 0.25"></Box>
<Appearance USE="цвет"></Appearance></Shape></Transform>
<Transform translation="0.275, -0.3, 0"><Shape USE="Палец"></Shape></Transform>
</Transform>
<OrientationChaser DEF='поворот' initialValue='1 0 0 0'
initialDestination='1, 0, -1, 3.1415'
</OrientationChaser>
<ROUTE fromNode = 'поворот' fromField = 'value_changed'
toNode = 'схват' toField = 'set_rotation'></ROUTE>
</Scene></X3D></body></html>
```

Подводя итог теоретической части статьи, отметим следующее. Во-первых, если в процессе роботизации производств удастся расставить оборудование (МП, станки, накопители и т. д.) так, что ориентации рабочих органов (схватов, сверел, фрез и другого технологического инструмента) образуют конечную группу, то, используя конечное число переходов между ними, можно свести решение задач механики и управления из непрерывной области в дискретную. Например, для рассмотренных здесь осевых ориентаций количество переходов равно  $(24 \times 24 = 576)$  количеству ячеек в таблице умножения группы ООС. В случае использования осевых ориентаций, изоморфных поворотам правильного икосаэдра, у которого 60 самосовмещений, количество переходов – 3600 [11]. Конечно, количество комбинаций последовательностей переходов возрастает квадра-

точно, но это – цена за возможность дискретного анализа. Во-вторых, если не удастся свести проектирование РТК и ГПС к использованию теории конечных групп в части ориентаций оборудования и рабочих органов, то для перехода в дискретную область анализа достаточно на конечном множестве ориентаций оборудования и рабочих органов осуществлять переходы между ними на основе использования X3D-узла <OrientationDumper>, который декларирует плавный разгон в начале перехода и плавное торможение в его конце за заданное время. Множество таких переходов образует группу. С учетом морфизма таких переходов и их описания в виде многочлена времени четвертого порядка, коэффициенты которого вычисляются из заданных четырех краевых условий (с нулевой скоростью на краях), опять появляется возможность дискретного анализа. В-третьих, представление уравнений динамики МР в кватернионах и подстановка в них кватернионов перехода открывает новые возможности решения задач механики и управления. Уже полученные на этом пути результаты позволили нам разработать X3D-прототип схвата, в полях которого заложены различные возможности симуляции его функционирования. При этом пользователям предоставлена возможность разрабатывать собственные способы описания положений схвата в виде цифровых кодов или в виде их списков, содержащих информацию о начале и окончании каждого перехода, а также наличии или отсутствии тех или иных объектов манипулирования в схвате. Эти возможности позволяют просто и быстро кодировать симуляцию сложных техпроцессов. Конечно, для реализации такой гибкости необходимо для каждого уникального способа цифрового кодирования техпроцесса разработать соответствующий интерпретатор на любом из языков программирования, поддерживаемых в X3D. Мы для этого используем JavaScript (JS).

#### 4. Прототипирование схвата

Для освоения методики X3D-прототипирования достаточно владеть основами XML и X3D, которые можно изложить в нескольких абзацах, например, в следующих трех абзацах изложены основы XML.

XML – это метаязык, в котором изложены синтаксис и семантика языков разметки информации (декларативных языков программирования) в различных предметных областях. XML-код состоит из элементов, записываемых в следующем формате:

<имяОткрывающегоТэга атрибуты> содержимое элемента </имяЗакрывающегоТэга>

Имя открывающего и закрывающего тэга должно полностью (с учетом регистра) совпадать. Для элемента без содержимого можно использовать укороченную форму записи

<имяТэга атрибуты/>

Элемент может не иметь атрибутов или иметь один или несколько атрибутов, отделенных друг от друга пробельным символом. Каждый атрибут описывает отдельное свойство (параметр, показатель) элемента и записывается в следующем формате:

имяАтрибута = 'значение'

Вместо одинарных кавычек, в которых записывается значение атрибута, могут использоваться двойные кавычки, например, ООО = “ ‘AAA’ ”. Элемент не должен иметь атрибуты с одинаковыми именами.

В качестве содержимого элемента может выступать один или несколько элементов, т. е. элементы можно вкладывать друг в друга по правилу вложения матрешек друг в друга.

Таким образом, каждый XML-ориентированный язык основан на трех правилах – правиле записи элементов, правиле записи атрибутов и правиле правильного вложения элементов. Сложность XML-языков заключается в количестве элементов и их атрибутов. Например, в X3D сотни элементов, которые принято называть узлами, и каждый из них может иметь десятки атрибутов, которые принято называть полями. Это естественно, так как виртуальные миры – сложная и разнообразная предметная область. Наша предметная область (роботизация производств) проще. Поэтому на этапе создания прототипа ПС «СисТел» мы используем пару десятков X3D-узлов, в которых используем несколько полей. Более того, при помощи X3D-прототипов путем расширения X3D мы создаем предметно-ориентированный язык, предназначенный для моделирования МР, ША, ШМ, РТК, ГПС и других управляемых систем тел с решением задач механики и управления с анимацией. В статье [5] разработан протоузел с именем "прототипТела", который имеет единственное поле с именем "код". В листинге 2 приведен пример его использования.



**Листинг 2.** Пример правильного вложения X3D-узлов

```
<?xml version = "1.0" encoding = "UTF-8"?>
<X3D version = "3.2"> <WorldInfo title = 'груз_1.x3d'>
<Scene> <Background skyColor = "1 1 1"/> <Viewpoint position = "0, 0, 0.1"/>
  <ExternProtoDeclare name = "прототипТела" url = "прототипТела.x3d"/>
  <Transform>
    <ProtoInstance DEF = "винт" name = "прототипТела"> <fieldValue name = "код"/> </ProtoInstance>
  </Transform>
  <Script url = "груз_1.js"/>
</Scene>
</X3D>
```

В X3D имена узлов, как правило, начинаются с заглавной буквы. Имена полей, как правило, начинаются со строчной буквы. В листинге 2 первая строка называется преамбулой. Во второй строке записан открывающий тэг корневого узла и укороченный узел с информацией об имени файла, в котором сохранена разметка. В 3-й строке открыта сцена и в значениях полей следующих за ней двух укороченных узлов указано, что фон сцены белый (RGB-код цвета имеет значение "1, 1, 1") и за сценой наблюдают на удалении сто миллиметров вдоль оси аппликат СКС. Условимся для сокращения записи X3D-кода первые три строки и последние две опускать (не записывать), как это сделано в листинге 3.

**Листинг 3.** Пример неправильного вложения X3D-узлов

```
<ExternProtoDeclare name = "прототипТела" url = "прототипТела.x3d"/>
<Transform> <ProtoInstance DEF = "тело" name = "прототипТела"> </Transform>
<fieldValue name = "код"/> </ProtoInstance>
```

Из листинга 3 видно, что узел <Transform> закрылся раньше, чем закрылся вложенный в него протоузел <ProtoInstance>, т. е. нарушено правило – первым открылся, последним закрылся (как в матрешках).

Остальные детали X3D опишем по мере необходимости.

Процесс разработки и описания созданного прототипа рекомендуем разбивать на этапы. Здесь рассматриваются два их них.

В любой разработке все начинается с формулировки целей и задач, решение которых обеспечивает достижение целей. Заканчивается разработка описанием путей решения задач и реализацией одного из них. В случае разработки X3D-прототипов желательно, чтобы каждый этап разработки приближал нас к целевым X3D и JS-кодам. Поэтому на первом этапе в качестве формулировки целей мы предлагаем представить экземпляр прототипа со значениями протополей по умолчанию и кратко описать цели их использования с привязкой к целям разработки. Для прототипа схвата такой экземпляр представлен в листинге 4.

**Листинг 4.** Декларация экземпляра, определенного как "схватПоУмолчанию", прототипа схвата с именем "проСхват"

```
<ProtoInstance DEF = "схватПоУмолчанию" name = "проСхват">
  <fieldValue name = "место" value = "0, 0, 0"/>
  <fieldValue name = "ориентация" value = "1, 0, 0, 0"/>
  <fieldValue name = "положение" value = "0, 0" />
  <fieldValue name = "разводПальцев" value = "0"/>
  <fieldValue name = "жатьКлавиши" value = "false"/>
  <fieldValue name = "перенос" value = "0"/>
  <fieldValue name = "поворот" value = "0"/>
  <fieldValue name = "переходы" value = "0"/>
</ProtoInstance>
```

Здесь и далее в соответствии с принципами XML текстовые значения полей и имен полей расширения записываются на языке основных пользователей (на русском языке). В XML рекомендуется вводить имена полей так, чтобы они были короткими и информационно емкими. Со своей стороны мы стремимся не перегружать протоузлы протополями (полями расширения). Например, в прототипе "проСхват" их меньше десяти.

Поле DEF является полем общего назначения. Его используют для идентификации узлов, включая и протоузлы, т. е. узлы расширения языка X3D. Заметим, что имя DEF поля начинается с заглавной буквы (это исключение из правила именования полей) и это имя образовано из термина definition (определение).

Для описания назначения протополей и их соответствий целям разработками использованы термины "место", "ориентация" и "положение" управляемого тела, принятые в монографиях [13, 14]. Поле с именем "место" содержит Декартовы Координаты (ДК) полюса схвата, которые направляются в поле translation УТ, содержащего разметку схвата, меняя таким образом место схвата на сцене. Поле с именем "ориентация" содержит значение ПЭ, которое направляется в поле rotation УТ для изменения ориентации схвата. Из двух десятков полей УТ здесь использованы только два из них (translation и rotation).

Поле "положение" содержит Цифровой Код (ЦК), описывающий одно или несколько положений схвата. Это поле предоставляет пользователям возможность вводить собственные параметры положения схвата, если разработан JS-код вычисления ДК и ПЭ через эти параметры. Таким образом, реализуется важнейшая цель разработки – предоставить пользователям возможность использовать любые параметры для описания положения схвата в пространстве сцены. Мы предлагаем первым числом ЦК кодировать тип координат полюса схвата: 0 – ДК; 1 – цилиндрические; 2 – сферические; 3 – ангулярные; 4 – обобщенные. Вторым кодировать тип параметров ориентации: 0 – ПЭ; 1 – углы Эйлера; 2 – углы Брайнта; 3 – кватернион; 4 – целевые координаты двух точек схвата, не лежащих на одной прямой с его полюсом; 5 – код ООС. Можно ввести в рассмотрение и другие параметры ориентации, например, параметры Кейли – Клейна. Для этого необходимо разработать JS-функцию, вычисляющую ПЭ через параметры Кейли – Клейна. Более того, можно использовать и другие параметры положения, например, бикватернионы, разработав для этого JS-код, вычисляющий на их основе ДК полюса схвата и ПЭ его ориентации, а также в качестве первых двух чисел ЦК положения принять, например, числа 5, 6. Если ЦК положения схвата содержит два нуля, то, по умолчанию, ДК = (0,0,0) и ПЭ = (1,0,0,0), что соответствует положению схвата в центре сцены, где пальцы направлены горизонтально вправо, большой вертикально вверх.

Значение поля "разводПальцев" содержит расстояние (в метрах) между пальцами схвата. Логическое значение поля "жатьКлавиши" управляет запуском режима управления анимацией при помощи клавиш.

Варианты использования полей "перенос", "поворот", "переходы" и интерпретация их ЦК определяются пользователями. Мы рекомендуем следующие варианты их использования. Поле "перенос" содержит ЦК, описывающий целевые координаты полюса схвата относительно Системы Координат (СК) его предка (по умолчанию сцены). Первое число кода указывает на тип координат полюса схвата, за которым следуют значения соответствующих параметров (смотрите описание поля "положение"). Видно, что по умолчанию используются ДК. Если записано одно значение (ноль), то остальные три числа ДК (абсцисса, ордината и аппликата) по умолчанию равны нулю. Поле "поворот" содержит ЦК, описывающий целевую ориентацию схвата в СК его предка (смотрите описание поля "положение"). Поле "переходы" содержит список, элементы которого описывают последовательность положений схвата и соответствующих им моментов времени, отсчитываемых от события запуска переходов. Код каждого положения аналогичен описанному ранее коду протополя "положение".

На втором этапе описания разрабатываемого прототипа рекомендуем представить его без разметки тела прототипа <ProtoBody>, т. е. достаточно привести только интерфейсную часть. Такой вариант прототипа схвата представлен в листинге 5.

**Листинг 5.** Разметка интерфейсной части прототипа "проСхват"

```
<ProtoDeclare name = "проСхват">
  <ProtoInterface>
    <field name = "место" type = "SFVec3f" accessType = "inputOutput" value = "0, 0, 0"/>
    <field name = "ориентация" type = "SFRotation" accessType = "inputOutput" value = "1,0,0,0"/>
    <field name = "положение" type = "MFFloat" accessType = "inputOutput" value = "0"/>
    <field name = "разводПальцев" type = "SFFloat" accessType = "inputOutput" value = "0"/>
    <field name = "жатьКлавиши" type = "SFBool" accessType = "inputOutput" value = "false"/>
    <field name = "перенос" type = "MFFloat" accessType = "inputOutput" value = "0"/>
    <field name = "поворот" type = "MFFloat" accessType = "inputOutput" value = "0"/>
    <field name = "переходы" type = "MFFloat" accessType = "inputOutput" value = "0"/>
  </ProtoInterface>
  <ProtoBody> <!-- разметка тела прототипа --> </ProtoBody>
```

В отличие от листинга 4 здесь для каждого протополя представлены тип его значения и тип доступа к этому полю. В X3D все типы данных разбиты на два класса: Single-Value (однозначный) и Multiple-Value (многозначный). Имена типов полей класса Single-Value начинаются с символов SF и хранят только одно значение (число, 2-, 3- или 4-мерный вектор и т. п.). Имена типов полей класса Multiple-Value начинаются с символов MF и могут содержать список перечисленных значений. Например, значения поля version относятся к типу SFFloat (одно действительное число). В листинге 5 использованы следующие типы. SFBool – одно логическое (булево) значение true (истина) или false (ложь). SFFloat, MFFloat – одно или несколько вещественных чисел. SFRotation – один ПЭ. SFVec3f – один трехмерный вектор (тройка действительных чисел).

Каждое поле имеет один из четырех типов доступа. При создании новых (авторских) узлов, расширяющих X3D-возможности, типы доступа к новым полям задаются в поле accessType. Если accessType = "initializeOnly", то поле является закрытым, т. е. содержит неизменяемые исходные значения свойств узла. Поле, у которого accessType = "inputOnly", называют in-полем (входным полем). Это поле является контейнером для изменяемых данных, которые могут поступать в это поле от выходных полей других узлов. Для выходного (out-) поля accessType = "outputOnly". Out-поле содержит значения, которые можно отправить в другие поля. Если accessType = "inputOutput", то имеет место inOut-поле, в которое можно записать новые значения и прочитать изменившиеся значения, т. е. inOut-поле является одновременно in-полем и out-полем. Таким образом, декларативный язык программирования X3D строго типизирован (значения полей относятся к одному из тридцати типов) и каждое поле имеет один из четырех типов доступа. Мы считаем, что на этапе разработки прототипа ПС преждевременно рассматривать вопросы необходимости и/или достаточности режима доступа к полям, а также защиты полей от несанкционированного доступа. Поэтому из четырех возможных режимов (типов) доступа к полям мы используем последний (универсальный) тип.

Коротко остановимся на путях решения задач анимации программных движений схвата и операций захвата и отпуска (взять/отдать) объектов манипулирования (грузов) в пальцах схвата. Отметим, что решение этой задачи тесно связано с типом схвата. Разница между простейшим двухпальцевым и универсальным пятипальцевым схватом большая. В намеченном пути развития ПС «СисТел» прототипом первой системы тел является «проСхват» и последним (возможно крайним) будет «проШМ», т. е. прототип многоногой Шагающей Машины (ШМ), основанный на прототипах МР, используемых в качестве ног ШМ. Очевидно, что между универсальным схватом и пятиногой ШМ возможен морфизм [9]. Поэтому на текущем этапе разработки рано стремиться к обобщениям и универсализации. Тем более что в промышленной робототехнике пока доминируют простые схваты. Возможности экземпляров прототипа схвата «проСхват» достаточны для моделирования его работы в качестве схватов МР в составе РТК межоперационного транспортирования, покраски и даже сборки, если известны внешние виды объектов манипулирования и их количество.

Анимировать можно, например, цвет тела или его деформацию. Для анимации поступательного и/или вращательного движений схвата можно использовать несколько способов и им соответствующих узлов. Выбор способов в основном зависит от преследуемых целей и решаемых

задач для их достижения. Достаточно подробно анимация тел и их систем с помощью X3D-узлов рассмотрена в книге [15]. В целом рассматривать, анализировать и рекомендовать эффективные способы анимации схвата без решения прямой и обратной задач кинематики схвата в составе МР – не продуктивно.

Для изменения положения схвата в процессе анимации достаточно синхронно менять значения полей translation и rotation УТ схвата, направив в них измененные значения ДК полюса схвата и ПЭ его ориентации. Перед этим если первые два числа ЦК протоплюа "положение" не равны нулю, то необходимо сначала вычислить ДК и ПЭ через используемые параметры положения. Задачи вычисления можно решать, например, в JS-функциях. В прототипе «проСхват» формулы вычисления ДК полюса схвата через полярные (для МР на плоскости), цилиндрические и сферические координаты взяты из справочника [16]. Формулы вычисления ДК через угловые и обобщенные координаты взяты из книги [17]. Формулы вычисления ПЭ через углы и кватернионы взяты из книг [18, 19]. Формулы вычисления кватерниона, описывающего ориентацию схвата через начальное положение двух точек схвата, не лежащих на одной прямой с его полюсом, и их конечным положением представлены в работе [12]. ПЭ через коды ООС определяются по табл. 1.

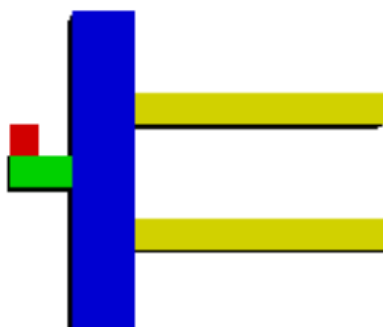


Рис. 3. X3D-модель схвата  
Fig. 3. X3D model of the gripper

В отличие от рис. 1 X3D-модель схвата на рис. 3 на левом конце содержит выступ вверх в виде бокса. Во-первых, он как и стрелка на рис. 1 используется в словесном описании ориентации схвата, например, фраза "пальцы вправо выступ вверх" описывает ОС(13). Возможность такими фразами задавать ориентацию схвата позволит (в дальнейшем) реализовать в ПС «СисТел» речевой ввод информации при помощи XML-ориентированного языка VoiceXML. Во-вторых, этот выступ позволяет визуально наблюдать работу механизма байонета в процессе смены схвата [20].

### Заключение

Разработанный и описанный здесь прототип схвата используется в составе прототипов МР, работающих в различных системах координат (декартовой, цилиндрической, сферической, угловой). Варианты его использования разнообразны. Возможности введения собственных параметров описания положений схвата через их цифровое кодирование и разработку соответствующих интерпретаторов на любом из поддерживаемых в X3D языках программирования позволяет расширять это разнообразие.

Здесь, как и в заключении статьи [5], мы констатируем, что использовать прототип схвата «проСхват» можно без знания языка X3D. Действительно, внешний вид (геометрия) схвата и груза в нем описываются цифровыми кодами. Анимация движений схвата в техпроцессах описывается соответствующими списками цифровых кодов, интерпретаторы которых используют JS-коды, реализующие авторские способы анимации. Например, в текущей версии тела прототипа «проСхват» реализованы три авторских способа (тик-, клик- и вычисляемой) анимации, изложение которых выходит за пределы заявленной темы статьи.

### Список литературы

1. Захватные устройства промышленных роботов: учеб. пособие / К.А. Украженко, Ю.В. Янчевский, А.А. Кулебякин, А.Ю. Торопов. Ярославль: ЯГТУ, 2007. 88 с. ISBN 5-230-20645-4.
2. Игнатьев Н.П. Схваты автоматических манипуляторов и промышленных роботов: справочно-методическое пособие. 2012. 120 с.
3. Схваты роботов манипуляторов. URL: <https://kobotek.ru/katalog/zahvaty>.
4. Электромеханический схват с системой силового осязания / А.А. Маргун, Д.Н. Базылев, К.А. Зименко, П.Д. Вахвянова // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 1. С. 93–96. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-1-93-96
5. 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

6. Brutzman D., Daly L. X3D: Extensible 3D graphics for web authors. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007. 472 p. ISBN 978-0-12-088500-8.
7. Телегин А.И. Уравнения математических моделей механических систем. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1996. 182 с.
8. 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.
9. Лескин А.А. Алгебраические модели гибких производственных систем. Л.: Наука, 1986. 150 с.
10. Борисенко Л.А. Исследование манипуляционных свойств механизма двухосной ориентации // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2006. № 10. С. 152–158.
11. Александров П.С. Введение в теорию групп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980. 144 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 7).
12. Голубев Ю.Ф. Алгебра кватернионов в кинематике твердого тела // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. № 39. 23 с.
13. Коренев Г.В. Введение в механику человека. М.: Наука, 1977. 264 с.
14. Коренев Г.В. Введение в механику управляемого тела. М.: Наука, 1964. 568 с.
15. Телегин А.И., Тимофеев Д.Н., Читалов Д.И. Х3D-моделирование механических систем: опыт использования Х3D в моделировании механических систем. Южно-Уральский государственный университет, 2014. 66 с. URL: <http://elibraru.ru/item.asp?id=22585700>.
16. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М., 1962. 608 с.
17. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1978. 400 с.
18. Кирпичников С.Н., Новоселов В.С. Математические аспекты кинематики твердого тела. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 249 с.
19. Челноков Ю.Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. М.: Физматлит, 2006. 512 с. ISBN 5-9221-0680-5.
20. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1987. 560 с.

### References

1. Ukrazhenko K.A., Yanchevskiy Yu.V., Kulebyakin A.A., Toropov A.Yu. *Zakhvatnye ustroystva promyshlennykh robotov: ucheb. posobie* [Gripping devices for industrial robots. Training manual]. Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University, 2007. 88 p. (In Russ.) ISBN 5-230-20645-4.
2. Ignat'ev N.P. *Skhvaty avtomaticheskikh manipulyatorov i promyshlennykh robotov: spravochno-metodicheskoe posobie* [Grips for automatic manipulators and industrial robots. Reference and methodological manual], 2012. 120 p. (In Russ.)
3. *Skhvaty robotov manipulyatorov* [Grips of robot manipulators]. (In Russ.) Available at: <https://kobotek.ru/katalog/zahvaty>.
4. Margun A.A., Bazylev D.N., Zimenko K.A., Vakhviyanova P.D. Electromechanical gripper with force sensing system. *Journal of Instrument Engineering*. 2019;62(1):93–96. (In Russ.) DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-1-93-96
5. 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
6. Brutzman D., Daly L. X3D: Extensible 3D graphics for web authors. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007. 472 p. ISBN 978-0-12-088500-8.
7. 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.)
8. Telegin A.I. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki sistem tel. S prilozheniyami v robototekhnike: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Fundamentals of theoretical mechanics of body systems. With applications in robotics: textbook for universities]. St. Petersburg: Lan; 2023. 252 p. (In Russ.) ISBN 978-5-507-45089-3.
9. Leskin A.A. *Algebraicheskie modeli gibkikh proizvodstvennykh sistem* [Algebraic models of flexible manufacturing systems]. Leningrad: Nauka Publ., 1986. 150 p. (In Russ.)
10. Borisenko L.A. [Investigation of the manipulative properties of the biaxial orientation mechanism]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamental'nye nauki*. 2006;(10):152–158. (In Russ.)

11. Aleksandrov P.S. *Vvedenie v teoriyu grupp* [Introduction to the theory of groups]. Moscow: Nauka. Main Editorial Board of Physics and Mathematics Literature, 1980. 144 p. (Library "Kvant". Iss. 7).
12. Golubev Yu.F. [Algebra of quaternions in rigid body kinematics]. *Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics*. 2013, no. 39. 23 p. (In Russ.)
13. Korenev G.V. *Vvedenie v mekhaniku cheloveka* [Introduction to human mechanics]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 264 p. (In Russ.)
14. Korenev G.V. *Vvedenie v mekhaniku upravlyаемого tela* [Introduction to the mechanics of a controlled body]. Moscow: Nauka Publ., 1964. 568 p. (In Russ.)
15. Telegin A.I., Timofeev D.N., Chitalov D.I. *X3D-modeling of mechanical systems: experience in using X3D modeling of mechanical systems*. South Ural State University; 2014. 66 p. (In Russ.) Available at: <http://elibraru.ru/item.asp?id=22585700>.
16. . Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike* [Handbook of Mathematics]. Moscow. Moscow, 1962. 608 p. (In Russ.)
17. Popov E.P., Vereshchagin A.F., Zenkevich S.L. *Manipulyatsionnye roboty: dinamika i algoritmy* [Manipulation robots: dynamics and algorithms]. Moscow: Nauka Publ., 1978. 400 p. (In Russ.)
18. Kirpichnikov S.N., Novoselov V.S. *Matematicheskie aspekty kinematiki tverdogo tela* [Mathematical aspects of rigid body kinematics]. Leningrad: Leningrad State University Publ., 1986. 249 p. (In Russ.)
19. Chelnokov Yu.N. *Kvaternionnye i bikvaternionnye modeli i metody mekhaniki tverdogo tela i ikh prilozheniya. Geometriya i kinematika dvizheniya* [Quaternion and biquaternion models and methods of solid mechanics and their applications. Geometry and kinematics of motion]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2006. 512 p. (In Russ.) ISBN 5-9221-0680-5.
20. Kraynev A.F. *Slovar'-spravochnik po mekhanizmam* [Dictionary and reference book on mechanisms]. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987. 560 p. (In Russ.)

#### **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](mailto:teleginai@susu.ru).

**Волович Георгий Иосифович**, д-р техн. наук, проф., директор, ООО «Челэнергоприбор», Челябинск, Россия; [g\\_volovich@mail.ru](mailto: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; [gusev@susu.ru](mailto:gusev@susu.ru).

**Пудовкина Светлана Геннадьевна**, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры прикладной математики и ракетодинамики, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия; [pudovkinasg@susu.ru](mailto: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](mailto:teleginai@susu.ru).

**Georgiy I. Volovich**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, LLC Chelenergopribor, Chelyabinsk, Russia; [g\\_volovich@mail.ru](mailto: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; [gusev@susu.ru](mailto:gusev@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](mailto: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 22.08.2025**

**The article was submitted 22.08.2025**

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДАННЫХ, ФИКСИРУЕМЫХ СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ УСТАНОВКИ РАЗВАРКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ

**Е.А. Семенищев**, *sea.sea@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-9817-0021>

*Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия*

**Аннотация.** Современное развитие электроники позволяет сформировать блоки обработки данных, обладающие высокой энергоэффективностью при малых габаритных размерах. Необходимость оцувствления и разработки блоков с возможностью анализа внешнего пространства стала важным элементом современных устройств. Развитие адаптивных и самоорганизующихся систем невозможно без устройств обработки и анализа данных. Облаетями применения выступают робототехника, системы управления, автовождение, медицина и др. Использование сенсорных блоков как элемента связи пространств и формирования их отображений в область информационных параметров сопряжено с их преобразованиями и упрощениями. Такое взаимодействие связано с внесением в данные помехи, борьба с которой и в современной технике является важной и актуальной задачей. **Цель исследования:** разработка адаптивных подходов к обработке данных многокритериальными методами и формирование реализаций для повышения точности систем технического зрения (СТЗ). **Методы.** Представлен метод многокритериальной обработки, основанный на минимизации комбинированного критерия, позволяющий осуществить функции реализации обнаружителя границ, сглаживания шумовой компоненты и выделения участков фон/объект. Предложена реализация для обработки двумерных сигналов в локальных областях. **Результаты.** Предложена блок-схема алгоритма последовательности обработки данных на основе многокритериальной целевой функции, которая позволяет производить обработку как изображений, так и одномерных массивов данных. Формирование возможности локальной обработки изображений, содержащей объекты, имеющие участки с резкими границами переходов, позволяет повысить эффективность в сравнении со стандартной реализацией. В качестве тестовых данных используются изображения СТЗ макета установки разварки полупроводниковых кристаллов. Предложенный алгоритм позволяет повысить различимость структур элементов, уменьшить шумовую компоненту, увеличить точность построения маски и улучшить визуальное качество данных. **Заключение.** Предложенное решение к повышению качества данных СТЗ макета установки разварки кристаллов полупроводниковых компонент позволяет осуществить сглаживания шумовой компоненты на локально-стационарных участках изображения с возможностью сохранения границ переходов, маркировки и специальных символов.

**Ключевые слова:** предварительная обработка данных, сглаживание, шум, изображение, система технического зрения

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках государственного задания № FSFS-2025-0009.

**Для цитирования:** Семенищев Е.А. Повышение качества данных, фиксируемых системой технического зрения установки разварки полупроводниковых кристаллов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 4. С. 59–68. DOI: 10.14529/ctcr250404

## IMPROVING THE QUALITY OF DATA RECORDED BY THE MACHINE VISION SYSTEM OF A CONTACT WELDING MACHINE FOR SEMICONDUCTOR CRYSTALS

**E.A. Semenishchev**, [sea.sea@mail.ru](mailto:sea.sea@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9817-0021>

*Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russia*

**Abstract.** Modern advances in electronics make it possible to create data processing units with high energy efficiency and compact dimensions. The need to sense and develop units capable of analyzing external space has become an essential element of modern devices. The development of adaptive and self-organizing systems is impossible without data processing and analysis devices. The use of sensor units as an element of spatial communication and the formation of their mapping into the domain of information parameters is associated with their transformation and simplification. This interaction introduces noise into the data, the control of which, even in modern technology, remains an important and pressing task. **Aim.** Development of adaptive approaches to data processing using multi-criteria methods and the formation of implementations to improve the accuracy of machine vision systems (MVS). **Materials and methods.** A multicriteria processing method based on the minimization of a combined criterion is presented. This method enables the implementation of edge detection, noise smoothing, and background/object region extraction. An implementation for processing two-dimensional signals in localized regions is proposed. **Results.** A flowchart of a data processing algorithm based on a multicriteria objective function is proposed. This algorithm enables processing of both images and one-dimensional data arrays. The ability to locally process images containing objects with sharp transition boundaries improves efficiency compared to the standard implementation. Data MVS of a semiconductor crystal bonding machine prototype are used as test data. The proposed algorithm improves the distinguishability of element structures, reduces noise, increases mask construction accuracy, and enhances the visual quality of the data. **Conclusion.** The proposed solution improves the quality of vision data for a semiconductor component chip bonding system layout. This enables smoothing of noise components in locally stationary image areas, while preserving transition boundaries, markings, and special symbols.

**Keywords:** data preprocessing, smoothing, denoising, image, machine vision system

**Acknowledgments.** The study was carried out within the framework of state assignment No. FSFS-2025-0009.

**For citation:** Semenishchev E.A. Improving the quality of data recorded by the machine vision system of a contact welding machine for semiconductor crystals. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(4):59–68. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250404

### Введение

Современное машиностроение невозможно без развития автоматизации, которое также необходимо для решения широкого спектра задач [1]. Формирование блоков автоматизированного анализа и принятия решения позволяют минимизировать труд человека и стоимость услуг, повысив производительность и скорость принятия решения. В качестве масштабируемости, показывающей применимость и необходимость развития, выступают такие области знаний, как: робототехника [2] – при построении модулей осязательства, движения или перемещения; системы в рамках концепции «Индустрия 4.0» и последующих [3]; медицина – при первичной постановке диагноза и проведении диагностических исследований; обучение – при анализе процесса усвоения материала и построении траектории образовательных процессов; управление – при построении сложных многокомпонентных систем и комплексов; и т. д.

Важным элементом развития систем управления и принятия решения являются блоки анализа данных [4]. Чаще всего их фиксация сопряжена с внесением помехи. Появление шума может быть связано с самим процессом формирования данных, преобразованиями, несовершенством блоков приёма информации или погрешностями измерений. Уменьшение действия сторонних факторов и выявление полезной составляющей в данных является первоочередным процессом во всех процедурах, строящихся на их основе.



Построение автоматизированных роботизированных комплексов и переход к реализации систем в рамках концепции «Индустрия 4.0+» основаны на применении интеллектуальных блоков [5–8]. Применение данных устройств требует развития как универсальности роботизированных систем, так и формирования новых вычислителей, позволяющих повысить автономность и адаптивную автоматизацию процессов. Разработка интеллектуальных систем автоматизации требует как формирования новых решений для нейросетевых подходов, так и развития систем очувствления [9]. Их базовым элементом выступает модуль сбора и преобразования данных. Информация об окружающем пространстве роботизированной системы формируется с использованием СТЗ. Данные фиксируются накоплением заряда на блоке светочувствительных матриц, которые подвержены влиянию шумовой компоненты [10]. Её появление связано как с физическими процессами внутри сенсоров, так и внешними воздействиями анализируемых процессов. При производстве изделий и пайке/разварке радиокомпонентов вокруг автоматизированных установок возникает пыль, связанная с процессами или внешней средой (в основном действием человека). При применении охлаждения или смазывающих жидкостей может возникать облако воздушно-капельной взвеси (похожей на туман). Долговременное применение химических растворов для очистки поверхностей оптики возникающие капли или пыль мешают прохождению светового потока и также могут осаживаться на линзах оптической системы. Появление паразитных емкостей и наводок, неравномерность освещения, устаревание радиоэлектронных компонент и воздействие электромагнитного излучения также накладывают ошибку на данные [11]. Возникновение помех повышает неточность в позиционировании систем и препятствует правильной реакции оператора на возможную неточность. Решение проблемы повышения качества данных в системах машинного зрения [12] может найти применение и в других областях, таких как: медицина – при анализе снимков рентгенограмм; космос – при анализе данных обсерваторий и спутниковых снимков; системы безопасности – при построении систем контроля доступа на объекты и др. Основным направлением исследования в работе выступают методы повышения качества видеоданных, полученных макетом СТЗ установки разварки радиоэлектронных компонент, фиксируемых в сложных условиях освещения и помехи.

### 1. Постановка задачи

Процесс получения данных об анализируемом параметре основан на использовании преобразования пространств информационных полей различными системами, которые могут быть как автоматизированными, так и основанными на участии человека. В первом случае в качестве помехи выступают: сам исследуемый процесс, внешние факторы среды, неидеальность инструмента, ошибки преобразования данных [13]. Во втором случае – чаще всего инструментальные ошибки и неточности в восприятии информации. Во многих случаях применение современных систем делает помеху достаточно малой, однако её появление не исключается. Чаще всего последующие системы строятся на цифровой обработке. Преобразование в цифровое поле уменьшает влияние аналоговых ошибок и внешних воздействий, в связи с чем его необходимо осуществить как можно ближе к чувствительному элементу. Математическую модель цифровых данных анализируемого параметра можно представить в виде выражения [14]

$$y_{i,j} = s_{i,j} + \eta_{i,j}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m},$$

где  $i$  – элементы строк изображения;  $j$  – элементы столбцов матрицы изображения;  $y_{i,j}$  – случайный процесс с фиксированными значениями  $y_{1,1}, y_{1,2}, \dots, y_{n,n}$  в заранее установленные моменты времени  $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ ;  $s_{i,j}$  – полезная компонента данных;  $\eta_{i,j}$  – шумовая составляющая взаимно независимых величин, подчинённых нормальному закону распределения с неизвестным средним квадратическим отклонением  $\sigma$  и нулевым математическим ожиданием.

В работе предлагается метод уменьшения шумовой компоненты путём сглаживания данных. Обработка осложнена малым набором доступной информации как о процессах, так и о шуме. Чаще всего снижение влияния шумовой составляющей осложняется отсутствием априорной информации о ее статистических характеристиках и виде исследуемой полезной составляющей [15]. Наличие такого вида ограничений сильно осложняет возможность использования классических методов. Существующие относительно низкие вычислительные возможности устройств, а также требование высокой скорости обработки вводят дополнительные ограничения

для применения методов обработки данных. Ограничения на ресурсы системы требуют развития универсальности для разрабатываемых методов и в случае их аппаратной реализации – возможность лёгкой перестройки. Повышение качества данных способствует точности последующих систем, включая блоки автоматизированного принятия решений и построения подсистем автоматического управления.

## 2. Многокритериальная обработка данных

Первичная обработка и повышение качества изображений направлена на увеличение различимости объектов, восстановление формы и уменьшение помехи или сглаживания с сохранением резких изменений функции. Человеческое зрение обладает особенностью концентрироваться на подвижных объектах на стационарном фоне либо искать резко отличающиеся элементы. В качестве таких элементов могут выступать как простой элемент на сложном фоне, так и сложный (высокодетализированный) объект на простом. Для одномерных сигналов, также характерны такие особенности. Резкие изменения в функции сигнала описывают протекание процесса на фоне покоя сенсора, наряду с этим наличие шума на медленно меняющихся данных является проблемой. В работе рассматривается комбинированный критерий сглаживания цифрового сигнала с возможностью переключения приоритета между формируемыми оценками, что позволяет определять как медленно меняющиеся (фоновые) данные, так и резко меняющиеся функции (детализированные участки). Используемая многокритериальная функция наряду с возможностью обнаружения и исключения одного типа данных из рассмотрения позволяет перестроить функцию для одновременной обработки временных рядов и многомерных сигналов. Математический вид многокритериальной целевой функции имеет вид

$$\begin{aligned} \varphi(\bar{s}_{i,j}) = & \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (\bar{s}_{i,j} - y_{i,j})^2 + \lambda \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (\bar{s}_{i,j} - \bar{s}_{i-1,j})^2 + \\ & + \mu \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (\bar{s}_{i,j} - \bar{s}_{i,j-1})^2 + \beta \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (\bar{s}_{i,j} - 2\bar{s}_{i+1,j} + \bar{s}_{i+2,j})^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\lambda, \mu, \beta$  – регулировочные положительные множители;  $\bar{s}_{i,j}$  – значения результата минимизации формируемых оценок. Регулировочные параметры лежат в пределах  $\lambda, \mu, \beta = 0,01 \dots 9,99$ . Использование регулировочных элементов позволяет ввести приоритетность одному или нескольким критериям. Усиление параметра  $\lambda$  позволяет задать вес для обработки строк двумерного сигнала. Параметр  $\mu$  используется для приоритетного анализа столбцов двумерных данных. Параметр  $\beta$  позволяет задать вес среднему квадрату разностей второго порядка для строк двумерных данных. Использование только одного из матричных элементов минимизирует цифровой ряд. Следует отметить, что при обработке данных метод не имеет концевых эффектов и способен анализировать выборки длиной от 3 значений.

В качестве первого критерия функции используется средний квадрат разности входной реализации и формируемой оценки  $\sum_i \sum_j (\bar{s}_{i,j} - y_{i,j})^2$ , позволяющий ввести возможность приближения значений к форме входного сигнала. Критерии среднего квадрата разности для строк  $\sum_i \sum_j (\bar{s}_{i,j} - \bar{s}_{i-1,j})^2$  и столбцов  $\sum_i \sum_j (\bar{s}_{i,j} - \bar{s}_{i,j-1})^2$  позволяют уменьшить шумовую компоненту путём повышения гладкости формируемой функции. Критерий среднего квадрата разности второго порядка  $\sum_i \sum_j (\bar{s}_{i,j} - 2\bar{s}_{i+1,j} + \bar{s}_{i+2,j})^2$  позволяет повысить скорость сходимости к гладкости функции. Зафиксируем параметр  $\alpha = 1/(2\beta + 4\lambda + 4\mu)$ . Для расчёта будем использовать следующие выражения:

$$\begin{aligned} c_{i,j} = & 1 + \lambda (\text{sign}(i) + \text{sign}(m-i)) + \mu (\text{sign}(j) + \text{sign}(n-j)); \\ \bar{s}_1 = & \frac{\alpha \cdot \sum_{i=1}^n \gamma_{n-i+1} \cdot y_i}{\beta_n}; \quad \gamma_k = \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k+j-1}{2j} \cdot \alpha^j; \quad \beta_k = \sum_{j=1}^k \binom{k+j-1}{2j-1} \cdot \alpha^j. \end{aligned} \quad (2)$$

Для определения остальных элементов функции данных используем выражение

$$\bar{s}_k = \gamma_k \cdot \bar{s}_1 - \sum_{i=1}^{k-1} y_i \cdot \beta_{k-i}, \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

Для двумерного сигнала используем выражение

$$\bar{s}_{i,j}^{k+1} = \left(1 - 2 \cdot \alpha \cdot c_{i,j}\right) \bar{s}_{i,j}^k + 2 \cdot \alpha \cdot \left(s_{i,j} + \lambda \left(\bar{s}_{i-1,j}^k + \bar{s}_{i+1,j}^k\right) + \mu \left(\bar{s}_{i,j-1}^k + \bar{s}_{i,j+1}^k\right)\right),$$

$$i = 0, 1, \dots, m, \quad j = 0, 1, \dots, n, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Регулировка параметров, а также анализ формируемых оценок позволяет реализовать блок обнаружения и сглаживания данных за счёт анализа разностных компонент.

### 3. Алгоритм многокритериальной обработки двумерных цифровых сигналов для задач повышения качества данных системы машинного зрения установки автоматизированного монтажа кристаллов

В работе для уменьшения действия помехи с применением многокритериальной минимизация целевой функции (1) определим последовательность основных операций, блок-схема которых представлена на рис. 1. Алгоритм предполагает возможность параллельного анализа данных как изображений (ветвь а), так и анализа одномерных массивов (ветвь б), что может быть использовано для поиска границ резких изменений функции. Данный детектор позволяет обнаруживать резкие изменения гладкости функции. Параллельный анализ данных с различными параметрами позволяет снизить шумовую составляющую на гладких участках и обнаруживать границы объектов для определения их формы.

Блок-схема последовательности обработки данных, представленная на рис. 1, позволяет выполнить операцию по снижению влияния шумовой составляющей и реализовать процедуру поиска границ резких переходов одномерной функции, используемой для обнаружения границ переходов объектов, расположенных в кадре. Предлагаемый алгоритм реализован нами следующим образом:

1. На первом этапе производится загрузка изображения, полученного высокоскоростной камерой низкого разрешения, считываются параметры работы камеры и данные о формируемых кадрах: скорость их получения, их размер, количество строк и столбцов, тип данных, цветовое пространство, глубина данных.

2. Выбор ветки обработки. Направление (а) используется для уменьшения шумовой компоненты для кадров видеопотока, ветвь (б) – для обработки одномерных рядов и обнаружения границ резких переходов. Обозначим направление (а) как (3а), направление (б) как (3б).

3а.1. Для обработки изображений используем фиксированные регулировочные параметры  $\lambda = 0,04$ ,  $\mu = 0,5$ ,  $\beta = 0$  [16]. На основании сформированных данных производим расчёт первичного параметра обработки точки оценки  $\bar{s}_1$  на основании выражения

$$\bar{s}_1 = \frac{\sum_i \left( \sum_j^{n-i} \binom{n+j-2}{2j} \left( \frac{1}{1+4\lambda+4\mu} \right)^j \right)}{(2\beta+4\lambda+4\mu) \sum_j \binom{n+j-1}{2j-1} \left( \frac{1}{1+4\lambda+4\mu} \right)^j}.$$

3а.2. Расчёт остальных элементов обработанной матрицы изображения:

$$\bar{s}_{i,j}^{k+1} = \left(1 - \frac{2c_{i,j}}{1+4\lambda+4\mu}\right) \bar{s}_{i,j}^k + \frac{2 \left( y_{i,j} + \lambda \left( \bar{s}_{i-1,j}^k + \bar{s}_{i+1,j}^k \right) + \mu \left( \bar{s}_{i,j-1}^k + \bar{s}_{i,j+1}^k \right) \right)}{1+4\lambda+4\mu}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

3а.3. В качестве критерия определения достижения минимума сглаживания будем использовать разностный критерий расстояния между соседними элементами:

$$\max_{\substack{1 \leq i \leq m, \\ 1 < j < n}} \left| (\bar{s}^{k-1}) - (\bar{s}^k) \right| \leq \frac{\varepsilon}{\left| \text{grad } \varphi(\bar{s}^k) \right| \sqrt{m \cdot n}}.$$

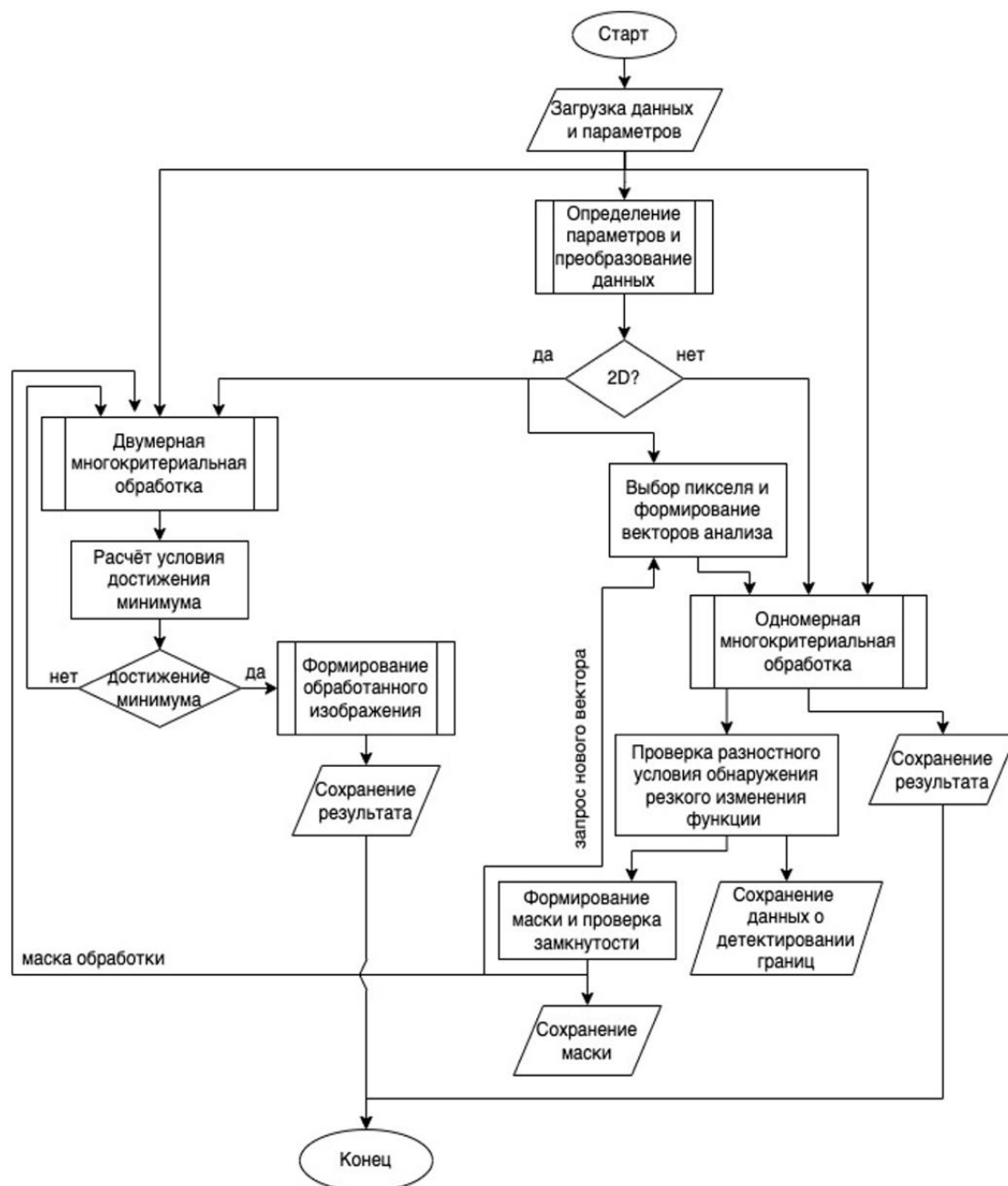


Рис. 1. Блок-схема последовательности обработки данных на основе многокритериальной целевой функции, используемая для повышения качества данных СТЗ и обнаружения границ объектов  
Fig. 1. Block diagram of the data processing unit based on a multi-criteria objective function, used to improve the quality of vision data and detect object boundaries

За.4. Проверка выполнения условия и пересчет параметров начиная с шага За.2, если требуемая точность  $\varepsilon = 0,001$ , не достигнута.

Зб.1. Для обработки одномерных сигналов малой длительности используем фиксированные регуляровочные параметры  $\lambda = 0$ ,  $\mu = 0$ ,  $\beta = 0,03$  [17] и производим расчёт первого элемента функции согласно выражениям (2) и остальных элементов, используя

$$\bar{s}_k = \gamma_k \cdot \bar{s}_1 - \sum_{i=1}^{k-1} y_i \cdot \beta_{k-i}.$$

Зб.2. Поиск границ резких переходов выполняется в восьми направлениях относительно выбранного пикселя в поле изображения. Обработка сформированной строки данных производится параллельно многокритериальной функцией (1) с зафиксированными данными  $j = \lambda = \mu = 0$ , при

этом используя параметры  $\beta = 0,03$  и  $\beta = 4,53$ . Анализ расхождения среднего квадрата формируемых оценок и сравнение его с порогом  $p = 0,1$  говорит о наличии резкого изменения формы сигнала, что является границей объекта [17]. В случае резкого изменения значения функции более чем на 10 % принимается решение о достижении его края, при этом на коротких выборках менее 3 отсчётов определитель является малоэффективным.

3б.3. Описываем окружностью, максимально приближенной к точкам соприкосновения с границей объекта. Для случая слитных областей производим полное сканирование объекта из точек объекта с параметрами 3б.2.

4. Данные о границах объектов используются для формирования маски обработки и разделения структур объектов и фона. Обработка производится внутри сформированных маской областей и сглаживается с использованием ветки (3а). Границы маски не обрабатываются.

#### 4. Экспериментальные данные и результаты

Для проверки эффективности предложенного в работе подхода сформированы тестовые данные в виде изображений с объектами простых форм (квадрат, круг, прямоугольник, звезда, группы объектов) и наложенными шумами, которые необходимы для оценки качества и настройки параметров. На рис. 2 представлен пример входных данных и результатов обработки для резко выделяющегося круглого объекта, расположенного на краю кадра размером  $1024 \times 768$  пикселей (изображение представлено в градациях серого).

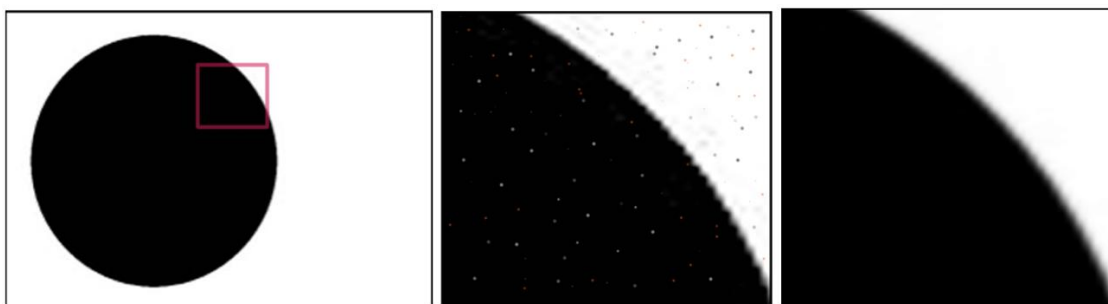


Рис. 2. Пример обработки тестового изображения, используемого для оценки эффективности и настройки параметров

Fig. 2. Example of processing a test image used for performance evaluation and parameter tuning

В таблице представлены результаты метрики оценки изображений с тестовыми объектами простых форм и наложенной на них шумовой компонентой, интенсивностью не более 10 % от амплитуды максимальных данных. Анализ результатов показал эффективность предложенного подхода, что связано с возможностью сглаживания шума на стационарных участках, сохранением границ переходов и минимальным их размытием на участке изменения гладкости функции.

Результаты анализа пикового отношения сигнала к шуму стандартного и предлагаемого алгоритма сглаживания изображений  
Results of the analysis of the peak signal-to-noise ratio of the standard and proposed image smoothing algorithms

	Квадрат	Круг	Прямо- угольник	Пара объектов	Звезда
Стандартный подход [14]	36,52	34,82	27,39	23,85	29,12
Предложенная в работе реализация	42,34	37,16	27,45	29,16	33,81

Для подтверждения применимости предложенной реализации для обработки данных СТЗ макета установки разварки полупроводниковых кристаллов разработана программная реализация алгоритма. На рис. 3 представлены примеры анализа натурных данных, фиксируемых сенсором разрешением  $2000 \times 2000$ , ограниченные полем выбора оператора установки (8 бит, цветное изображение, видимый диапазон). В качестве анализируемых объектов используются подложки и кристаллы чипов радиоэлектронной компонентной базы.

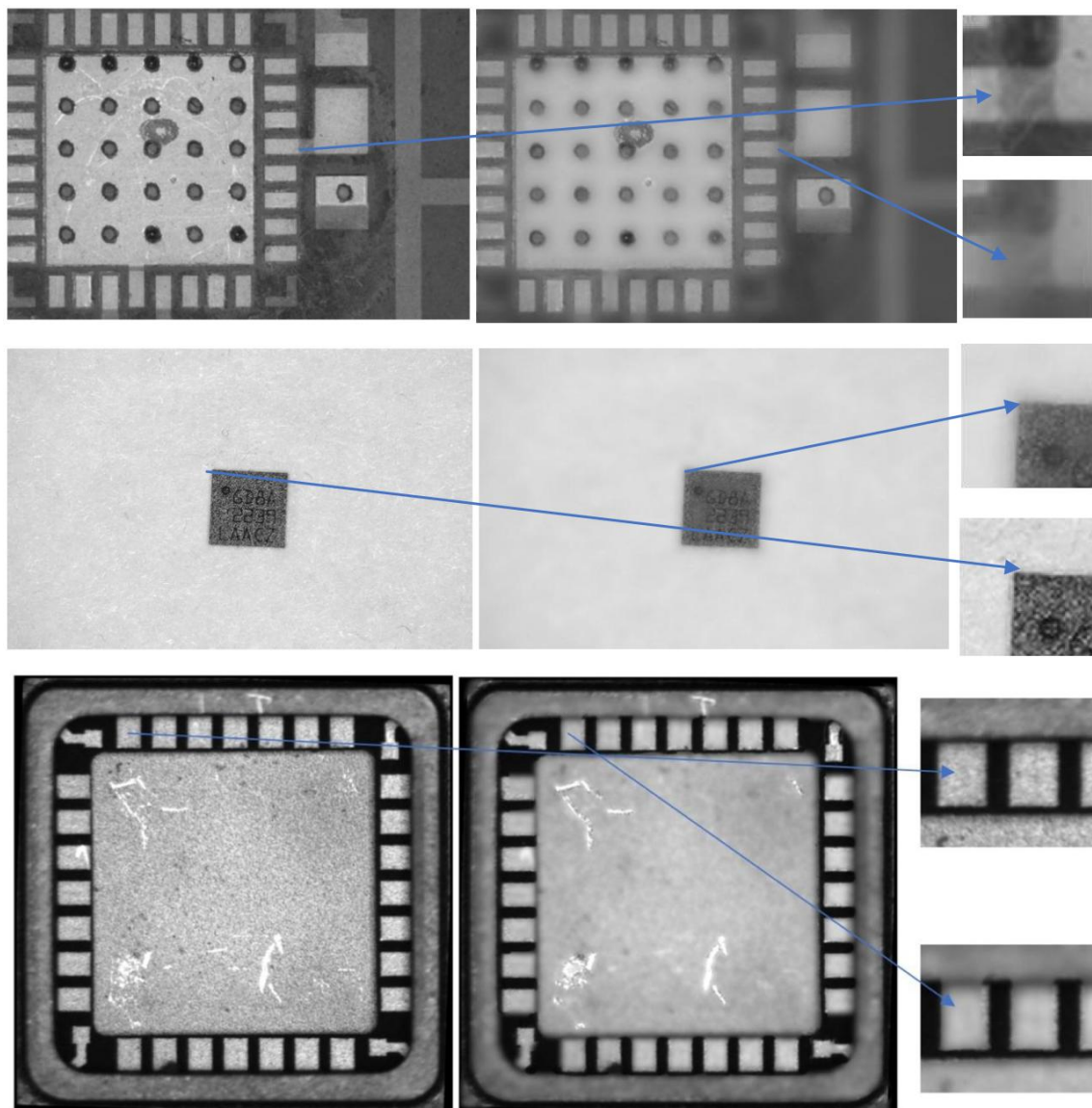


Рис. 3. Пример предварительной обработки изображений, фиксируемых макетом  
системы машинного зрения  
Fig. 3. An example of pre-processing of images captured by a machine vision system model

Представленные на рис. 3 результаты обработки данных СТЗ макета установки показывают применимость предложенного в работе подхода для обработки двумерных данных с использованием многокритериальной целевой функции. Анализ представленных результатов показывает, что для случая присутствия в структуре границ переходов, близких по интенсивности, может происходить сглаживание его края при подавлении шума. Следует отметить, что алгоритм оказался невосприимчив для обработки данных с малыми амплитудами границ переходов и для этих случаев требует подстройки параметров. При этом в большинстве случаев удалось сохранить тишину границы объектов и уменьшить действие шумовой компоненты. Для объектов с сильным разделением интенсивности цвета происходит подавление шумовой компоненты с сохранением границ переходов между объектами. Также следует отметить, что предложенная программная реализация позволяет сохранить границы переходов, метки и текст, расположенный в зоне видимости камеры, с возможностью сглаживания локально стационарных участков фона.

#### Выводы и заключение

В результате выполнения исследования был предложен подход к повышению качества полученных данных СТЗ макета установки разварки кристаллов полупроводниковых компонент, по-



звляющий производить уменьшение шумовой компоненты с возможностью обнаружения объектов и сохранением границ переходов, маркировки и специальных символов. Программная реализация позволяет производить обработку как изображений, так и одномерных массивов данных. Формирование возможности локальной обработки изображений с объектами, имеющими участки с резкими границами переходов, позволяет повысить эффективность в сравнении со стандартной реализацией. Следует отметить, что при анализе натуральных данных, формируемых СТЗ, при малых амплитудах переходной функции граница/фон метод показал избирательность к обнаружению границы. Повышение чувствительности алгоритма приводит к захвату ложных участков. Продолжением дальнейшего исследования будет введение адаптивного интеллектуального изменения параметра для различных типов или элементов изображения.

### Список литературы/References

1. Bhatt K., Agrawal C., Bisen A. A review on emerging applications of IoT and sensor technology for Industry 4.0. *Wireless Personal Communications*. 2024;134(4):2371–2389. DOI: 10.1007/s11277-024-11054-x
2. Proia S., Carli R., Cavone G., Dotoli M. Control Techniques for Safe, Ergonomic, and Efficient Human-Robot Collaboration in the Digital Industry: A Survey. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2021;19(3):1798–1819. DOI: 10.1109/TASE.2021.3131011
3. Gorecky D., Schmitt M., Loskyll M., Zühlke D. Human-machine-interaction in the industry 4.0 erac. In: *2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Porto Alegre, Brazil, 2014. P. 289–294. DOI: 10.1109/INDIN.2014.6945523
4. Kuts V., Otto T., Tähemaa T., Bukhari K., Pataria T. Adaptive industrial robots using machine vision. In: *Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 2: Advanced Manufacturing*. Pittsburgh, Pennsylvania, USA. 2018. V002T02A093. ASME. DOI: 10.1115/IMECE2018-86720
5. Nezhmetdinov R.A., Charuiskaya M.A., Kovalev I.A. Enterprise Development Planning and AI-Based Technological Forecasting. *Russian Engineering Research*. 2023;43(10):1284–1288. DOI: 10.3103/S1068798X23100234
6. Sciacivico L., Siciliano B. *Modelling and control of robot manipulators*. Springer Science & Business Media, 2012.
7. Voronin V., Zhdanova M., Semenishchev E., Zelenskii A., Cen Y., Agaian S. Action recognition for the robotics and manufacturing automation using 3-D binary micro-block difference. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;117(7):2319–2330. DOI: 10.1007/s00170-021-07613-2
8. Safeea M., Neto P., Bearee R. On-line collision avoidance for collaborative robot manipulators by adjusting off-line generated paths: An industrial use case. *Robotics and Autonomous Systems*. 2019;119:278–288. DOI: 10.1016/j.robot.2019.07.013
9. Tzampazaki M., Zografos C., Vrochidou E., Papakostas G.A. Machine vision—moving from Industry 4.0 to Industry 5.0. *Applied Sciences*. 2024;14(4):1471. DOI: 10.3390/app14041471
10. Irie K., McKinnon A.E., Unsworth K., Woodhead I.M. A technique for evaluation of CCD video-camera noise. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2008;18(2):280–284. DOI: 10.1109/TCSVT.2007.913972
11. Vaseghi S.V. *Advanced digital signal processing and noise reduction*. John Wiley & Sons, 2008. 509 p.
12. Kumar P., Singh D., Bhamu J. Machine vision in industry 4.0: Applications, challenges and future directions. In: *Machine Vision for Industry 4.0*. CRC Press, 2022. P. 263–284. DOI: 10.1201/9781003122401-13
13. Tuzlukov V. *Signal processing noise*. CRC Press, 2018. 662 p.
14. Semenishchev E., Marchuk V., Shrafel I., Dubovskov V., Onoyko T., Maslennikov S. Image denoising using a combined criterion. In: *Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications 2016*. SPIE, 2016. Vol. 9869. P. 96–102. DOI: 10.1117/12.2223610
15. Price J., Goble T. Signals and noise. In: *Telecommunications Engineer's Reference Book*. Butterworth-Heinemann, 1993. P. 0/1, 10/3–10/15.

16. Semenishchev E.A., Voronin V.V., Marchuk V.I. Image denoising and deblurring using multi-spectral data. In: *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XXIII*. SPIE, 2017. Vol. 10198. P. 444–449. DOI: 10.1117/12.2262510

17. Semenishchev E., Shraifel I., Marchuk V., Svirin I., Makov S. A multi-criteria method for noise reduction. In: *2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. IEEE, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807651

#### ***Информация об авторе***

**Семенищев Евгений Александрович**, канд. техн. наук, доц., ведущий научный сотрудник лаборатории разработки оборудования для производства электронной компонентной базы, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия; sea.sea@mail.ru.

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

**Evgenii A. Semenishchev**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Principal Scientist Officer of the Laboratory for the Development of Equipment for the Production of Electronic Component Base, Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, Russia; sea.sea@mail.ru.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflict of interests.

***Статья поступила в редакцию 20.09.2025***

***The article was submitted 20.09.2025***



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

Научная статья

УДК 658.51

DOI: 10.14529/ctcr250405

## ВНЕДРЕНИЕ LEAN-ИНСТРУМЕНТОВ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОЕКТА

**С.А. Баркалов**, [sbarkalov@nm.ru](mailto:sbarkalov@nm.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

**Т.А. Аверина**, [ta\\_averina@mail.ru](mailto:ta_averina@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>

**А.С. Пелихова**, [anastasiapelihova004@gmail.com](mailto:anastasiapelihova004@gmail.com)

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия*

**Аннотация.** В настоящее время строительные технологии активно развиваются. Проекты становятся более сложными, возрастают требования к срокам и качеству строительных проектов. Простой и исправление ошибок становятся все более дорогостоящими. В этой связи необходимо применение новых управленческих методик, методов и инструментов, учитывающих современные потребности. **Материалы и методы.** В работе проведен анализ литературных источников и статистических данных по вопросам применения инструментов бережливого производства. Синтезированы основные аспекты инструментов бережливого производства, являющиеся важными для строительных проектов. С помощью метода анализа иерархий осуществляется выбор методики бережливого производства, в наибольшей степени соответствующей требованиям и характеристикам строительного проекта. **Цель исследования** состоит в определении оптимального Lean-инструмента, направленного на повышение операционной эффективности строительного проекта. **Результаты.** Представлены ключевые факторы снижения операционной эффективности строительного проекта. Согласно имеющимся статистическим данным порядка 70–80 % всех потерь приходится на проектные ошибки и слабую коммуникацию в проектах, что подчеркивает необходимость и важность внедрения цифровых технологий, методик бережливого производства и современных инструментов взаимодействия стейкхолдеров. Рассмотрены ключевые Lean-инструменты, такие как Poka-Yoke, 5S, Visual Management и КПСЦ. Выделены их основные аспекты, направления применения, потенциальные эффекты при внедрении в строительстве. Представлена методика выбора наиболее подходящего Lean-инструмента для строительного проекта. Проведенный анализ показал, что наибольший потенциал для повышения операционной эффективности строительного проекта имеет методика 5S. **Заключение.** В целом же исследования показывают, что Lean-инструменты позволяют системно устранить неэффективности, такие как затраты на исправление брака и простои, что ведёт к значительному повышению общей производительности труда и сокращению времени строительства. Ключевым фактором успеха является комплексный подход, включающий обучение участников проекта, внедрение механизмов непрерывного совершенствования и создание среды для эффективной совместной работы.

**Ключевые слова:** бережливое производство, эффективность, строительный проект, управление

**Для цитирования:** Баркалов С.А., Аверина Т.А., Пелихова А.С. Внедрение Lean-инструментов как способ повышения операционной эффективности строительного проекта // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 4. С. 69–82. DOI: 10.14529/ctcr250405

Original article  
DOI: 10.14529/ctcr250405

## IMPLEMENTATION OF LEAN TOOLS AS A WAY TO INCREASE THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF A CONSTRUCTION PROJECT

**S.A. Barkalov**, [sbarkalov@nm.ru](mailto:sbarkalov@nm.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

**T.A. Averina**, [ta\\_averina@mail.ru](mailto:ta_averina@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>

**A.S. Pelikhova**, [anastasiapelikhova004@gmail.com](mailto:anastasiapelikhova004@gmail.com)

*Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia*

**Abstract.** Construction technologies are currently actively developing. Projects are becoming more complex, requirements for the timing and quality of construction projects are increasing. Downtime and error correction are becoming increasingly expensive. In this regard, it is necessary to apply new management techniques, methods and tools that take into account modern needs. **Materials and methods.** The paper analyzes literary sources and statistical data on the application of lean manufacturing tools. The main aspects of lean manufacturing tools that are important for construction projects are synthesized. Using the hierarchy analysis method, the lean manufacturing methodology that best meets the requirements and characteristics of the construction project is selected. **The research objective** is to determine the optimal Lean tool aimed at improving the operational efficiency of a construction project. **Results.** The key factors in reducing the operational efficiency of a construction project are presented. According to available statistics, about 70–80 % of all losses are due to design errors and poor communication in projects, which emphasizes the need and importance of introducing digital technologies, lean manufacturing methods and modern tools for stakeholder interaction. The key Lean tools such as Poka-Yoke, 5S, Visual Management and VSM are considered. Their main aspects, areas of application, potential effects when implemented in construction are highlighted. A methodology for selecting the most suitable Lean tool for a construction project is presented. The analysis showed that the 5S methodology has the greatest potential for improving the operational efficiency of a construction project. **Conclusion.** In general, studies show that Lean tools allow for the systematic elimination of inefficiencies such as the cost of correcting defects and downtime, which leads to a significant increase in overall labor productivity and a reduction in construction time. The key success factor is an integrated approach that includes training project participants, implementing continuous improvement mechanisms and creating an environment for effective teamwork.

**Keywords:** Lean manufacturing, efficiency, construction project, management

**For citation:** Barkalov S.A., Averina T.A., Pelikhova A.S. Implementation of Lean tools as a way to increase the operational efficiency of a construction project. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(4):69–82. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250405

### Введение

В последние годы строительная отрасль столкнулась с масштабными вызовами, обусловленными динамичными изменениями внешней среды. Колебания цен на строительные материалы, ужесточение экологических норм, дефицит квалифицированных кадров, а также экономическая и политическая нестабильность существенно повлияли на функционирование компаний в данном секторе. Одни предприятия смогли адаптироваться к новым условиям и сохранить позиции на рынке, другие – были вынуждены сократить объемы деятельности или вовсе прекратить существование.

Несмотря на то, что значительная часть строительных организаций нашла способы приспособления к новым реалиям, сохраняется высокая степень неопределенности, влияющая на стратегическое и оперативное управление. Долгосрочное планирование становится затруднительным, а порой и рискованным, поскольку прогнозирование экономических и технологических трендов в условиях нестабильности лишено прежней точности. Кроме того, ранее применяемые подходы к управлению проектами, ресурсами и финансами постепенно теряют эффективность, тогда как новые методы и инструменты требуют значительных инвестиций, времени на внедрение и апробацию.

В результате строительным компаниям становится сложнее достигать ожидаемых результатов, поддерживать устойчивый рост и обеспечивать конкурентоспособность. Возникает необходимость в поиске инновационных решений, повышении гибкости организационных структур и внедрении цифровых технологий, которые позволяют минимизировать риски и быстрее адаптироваться к меняющимся условиям [1–4].

Согласно исследованиям НИУ ВШЭ, производительность труда российских компаний повышается достаточно низкими темпами. Если в 2000-е годы она увеличивалась примерно на 5 % в год, то в 2010-е этот показатель упал до 1,6 %, а во времена пандемии приблизился к нулю [5].

Обращаясь к строительной отрасли, отметим, что производительность труда здесь показывает самые низкие темпы роста среди других отраслей за последние 20 лет, на данный момент она находится почти на уровне сельского хозяйства [6].

При этом, согласно данным Росстата, в 2022 году производительность труда в российской строительной отрасли все же продемонстрировала рост на уровне 1,8 %. Данный результат во многом обусловлен участием строительных организаций в реализации национального проекта «Производительность труда». Но даже при положительной динамике показатели отрасли оказались ниже среднеэкономических значений, где в целом была зафиксирована отрицательная тенденция – снижение на 3,6 % [7].

Если говорить о мировых масштабах, то здесь картина также складывается не лучшим образом. Согласно данным центра макроэкономического анализа и краткосрочного прогнозирования, отечественная строительная отрасль весьма низкопроизводительна: производительность труда здесь составляет 88 % от модельного, 47 % – от стран Западной Европы и 33 % – от США. В самом же строительстве дело обстоит еще печальнее: 53 % – от модельного, 34 % – от Западной Европы и 33 % – от США.

Такое отставание, по мнению аналитиков центра макроэкономического анализа и краткосрочного прогнозирования, – следствие влияния следующих факторов [8]:

- низкий уровень автоматизации и роботизации отрасли. Так, например, показатель роботизации – около 11 роботов на 10 000 сотрудников, тогда как в промышленности Китая – до 322 [9];
- недостаток квалифицированных кадров: на сегодняшний день порядка 40 % рабочих в строительной отрасли не имеют профильного образования [10];
- устаревшая техника и малоэффективные процессы являются следствием отсутствия цифровых решений и бережливого производства в рамках реализации строительных проектов.

Таким образом, в условиях экономической нестабильности для снижения издержек предприятия и оптимизации себестоимости конечного продукта необходимо четко учитывать потребности потребителя, минимизировать потери, а также развивать систему обучения и мотивации персонала. Решению указанных задач в значительной степени способствуют инструменты бережливого производства.

Кроме того, внедрение принципов бережливого производства в строительной отрасли способствует системному повышению производительности труда за счёт исключения неэффективных операций и оптимизации организации рабочих процессов. Практические исследования и результаты внедрений подтверждают рост производительности на 10–25 % [11], что позволяет рассматривать данную методологию как действенный инструмент повышения операционной эффективности.

Под операционной эффективностью строительного проекта подразумевается степень рациональности использования ресурсов (труда, материалов, техники, времени и капитала) при выполнении строительных работ с целью достижения заданных проектных параметров (сроки, бюджет, качество). Иными словами, это способность проекта: минимизировать потери; увеличивать производительность труда и ресурсов; обеспечивать согласованность процессов и их участников; достигать поставленных целей с наименьшими затратами при сохранении качества.

Кроме того, операционная эффективность напрямую влияет на экономическую результативность проекта: чем меньше непроизводительных затрат, тем выше скорость и ниже себестоимость строительства.

Также не стоит забывать, что строительный проект отличается от промышленных производственных систем рядом особенностей, которые определяют специфику управления его эффективностью. К этим особенностям можно отнести, например, индивидуальность и уникальность

строительного проекта, которая проявляется в том, что каждый проект имеет свою архитектуру, конструктивные решения, площадку и условия реализации, а также в рамках строительного проекта нельзя полностью тиражировать процессы как, например, на заводе [12, 13].

**Цель работы** заключается в определении оптимального Lean-инструмента, направленного на повышение операционной эффективности строительного проекта.

## 1. Материалы и методы

В последние годы проектное управление претерпевает значительные изменения, обусловленные развитием цифровых технологий, глобализацией и усложнением организационных процессов. Современные исследования всё чаще сосредотачиваются на гибридных методологиях, цифровизации процессов и управлении рисками в условиях неопределённости.

Так, исследование PMI подчёркивает значимость интеграции традиционных методов с гибкими подходами (Agile, Scrum) для успешного управления проектами в условиях высокой динамичности рынка. Авторы приводят эмпирические данные, подтверждающие повышение эффективности проектов на 15–20 % при использовании гибридных моделей [14].

Как отмечают D. Bryde, M. Broquetas и J.M. Volm, внедрение технологий Building Information Modeling (BIM) позволяет сократить количество ошибок проектирования на 30–40 % и снизить до четверти затрат на координацию. Подобные выводы подтверждаются также исследованиями Azhar, где BIM рассматривается как ключевой инструмент повышения эффективности управления строительными проектами. [15, 16].

В работе И.И. Юшкина, С.Г. Аламеди и Н.А. Сташевской рассматриваются тенденции внедрения BIM/ТИМ-технологий в строительной отрасли России. Авторы отмечают, что при активном развитии нормативной базы уровень их практического применения остаётся низким – около 7–12 % компаний преимущественно в пилотных проектах, что ограничивает рост эффективности управления строительными проектами [17].

Важной темой современного проектного управления остаётся управление рисками. Согласно исследованиям Е. Osipova и Р. Eriksson, применение адаптивных моделей риск-менеджмента, сочетающих контроль и гибкость, повышает устойчивость строительных проектов и увеличивает вероятность их успешного завершения на 15–18 %. Аналогичные результаты демонстрируют исследования Р.Х.В. Zou, G. Zhang и J. Wang, подчёркивающие эффективность интегрированных подходов к управлению проектными рисками [18, 19].

Также следует отметить работу А.С. Селивановой и А.М. Платонова, в которой рассматриваются особенности мотивации проектных команд в девелоперской компании [20]. В исследованиях авторы подчёркивают важность выбора методов мотивации, системного подхода к развитию человеческого капитала и применения цифровых платформ для профессионального обучения.

Таким образом, современное проектное управление характеризуется интеграцией цифровых технологий, гибридных методологий и акцентом на управление рисками и человеческими ресурсами. Несмотря на значительный прогресс, существует необходимость в дальнейшем развитии адаптивных моделей управления, особенно в специфических отраслях, таких как строительство.

## 2. «Бережливое производство»: сущность и основные инструменты

Под системой «бережливое производство» понимают комплекс взаимно дополняющих и поддерживающих друг друга инструментов, направленных на повышение эффективности деятельности компании.

Бережливое производство (Lean Production) возникло как концепция повышения эффективности производственных систем за счёт устранения потерь и оптимизации потоков создания ценности. Его истоки восходят к производственной системе Toyota, разработанной в Японии во второй половине XX века Тайити Оно и Эйдзи Тойодой.

Концепция получила широкое признание после публикации исследований Джеймса Вумека, Дэниела Джонса и Дэниела Руса в книге «The Machine That Changed the World» (1990), где термин Lean Production был впервые введён для описания японской модели производства [21].

Сегодня же Lean рассматривается как универсальная управленческая философия, ориентированная на создание ценности для клиента при минимальных затратах ресурсов, и продолжает

развиваться в рамках интеграции с цифровыми технологиями, бережливого проектирования и устойчивого развития.

Внедрение бережливого производства позволяет бизнесу повысить качество реализуемых товаров и услуг, а также производительность труда с минимальными инвестиционными затратами [22].

Кроме того, стоит отметить, что данная система служит инструментом выхода компании из кризисных ситуаций, что особенно актуально в настоящее время, ведь в период кризиса бизнес обладает ограниченным количеством ресурсов, которые необходимо использовать максимально бережно.

Также хотелось бы уделить внимание статистической сводке, которая отражает процент внедрения инструментов бережливого производства по отраслям. Данные представлены на рис. 1 [23].

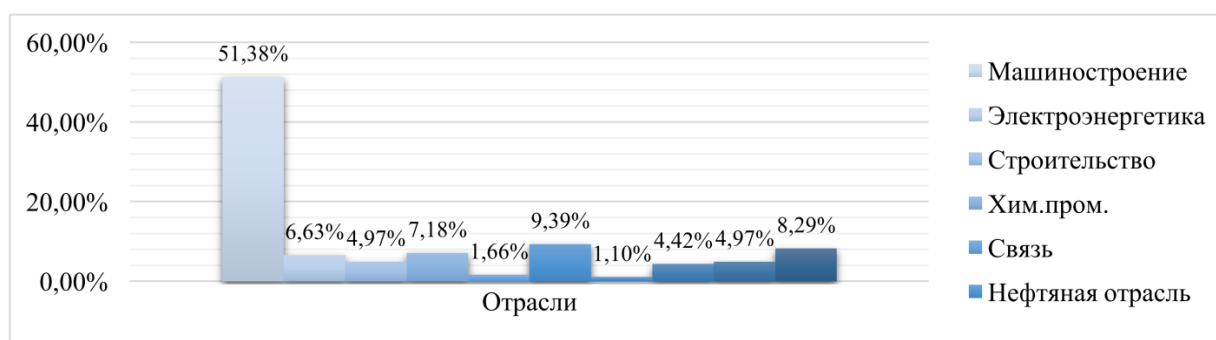


Рис. 1. Распределение Lean-инструментов по отраслям  
Fig. 1. Distribution of Lean tools by industry

Строительство входит в пятерку отраслей по внедрению Lean-инструментов. Таким образом, можно сделать вывод, что выдвигаемое предложение по внедрению инструментов «бережливого производства» в строительный проект является актуальным.

Говоря об операционной эффективности строительного проекта, следует определить наиболее часто встречающиеся факторы снижения его качества. На основании анализа различных источников, [24–26] были выявлены следующие причины (табл. 1).

Причины переделок и брака в строительных проектах (обобщенно)

Таблица 1

Reasons for rework and defects in construction projects (summarized)

Table 1

Причина	Доля потерь, %
Низкое качество коммуникаций и передаваемой информации	48–52
Ошибки в проектировании	25–35
Неэффективное планирование работ	≈ 25
Низкий уровень квалификации кадров	≈ 15
Неорганизованность логистических процессов	≈ 20

Совокупно 70–80 % всех потерь приходится на проектные ошибки и слабую коммуникацию, что подчёркивает критическую важность внедрения BIM-технологий, Lean и современных инструментов взаимодействия для снижения брака и повышения эффективности.

Вновь обращаясь к системе бережливого производства, учитывая специфику строительных проектов, были изучены различные ее инструменты и для дальнейшего рассмотрения выделены те, которые способны минимизировать или же полностью устранить влияние негативных факторов, сказывающихся на конечном качестве строительного проекта.

Подробнее рассмотрим следующие инструменты:

- Рока-Yoke – защита от ошибок;
- стандартизация работ;

- методика 5S;
- Visual Management – визуальный контроль;
- карты потока создания ценности (КПСЦ).

На основании проведенного анализа основные аспекты каждого из инструментов структурированы в табл. 2 [27].

Анализ Lean-инструментов

Таблица 2

Table 2

Analysis of Lean Tools

Инструмент	Цель применения	Эффект	Пример применения
Poka-Yoke	Исключение возможности совершения ошибки, которая может повлечь за собой брак	Устраняет дефекты на ранней стадии (в момент выполнения той или иной операции)	<b>Проблема:</b> рабочие устанавливают арматуру с ошибками. <b>Решение:</b> специальные пластиковые фиксаторы / шаблоны, не дающие совершить ошибку. <b>Эффект:</b> снижение числа ошибок, повышение прочности конструкции
Стандартизация работ	Определение лучшего, безопасного и самого эффективного способа выполнения операции	Снижает вариативность, обеспечивает стабильность результатов	<b>Проблема:</b> разная укладка кирпича рабочими. <b>Решение:</b> создание технологической карты укладки кирпича. <b>Эффект:</b> снижение кол-ва дефектов (треснувшие швы, неровности)
5S	Эффективная организация рабочего пространства	Уменьшается вероятность ошибок и дефектов, травм, простоев	<b>Проблема:</b> рабочие теряют время на поиск инструментов, растёт риск травм и ошибок. <b>Решение:</b> убрали лишнее, организовали хранение, ввели ежедневную уборку, закрепили правила, внедрили самодисциплину. <b>Эффект:</b> снижение времени на подготовку к работе на 30 %, меньше травм и брака
Visual Management	Быстрая и понятная подача информации на рабочем месте с помощью визуальных средств: меток, табличек, графиков, схем, сигналов и т. д.	Операции становятся прозрачны и понятны для всех участников процесса, руководство оперативно реагирует на отклонения	<b>Проблема:</b> задержки из-за неясности статуса работ и местоположения материалов. <b>Решение:</b> внедрили цветовую маркировку зон, стенды с информацией о ходе работ. <b>Эффект:</b> сокращение времени на поиск информации и инструмента
КПСЦ	Анализ потока создания ценности	Обнаружение неэффективных и дефектных операций	<b>Проблема:</b> долгий срок строительства наружных сетей. <b>Решение:</b> исключили лишние согласования, объединили поставки. <b>Эффект:</b> сократились сроки, число простоев

Таким образом, из табл. 2 видно, что каждый из рассмотренных инструментов несет в себе определенный эффект, который в конечном счете положительно сказывается на качестве проекта и его эффективности в целом.

### 3. Выбор оптимального Lean-инструмента

Далее определим наиболее предпочтительный инструмент, применение которого может повысить качество и эффективность строительного проекта с минимальными временными и финансовыми затратами, что особенно важно в нынешних экономических реалиях. Для оценки альтернатив будут использованы следующие критерии:

$K_1$  – сокращение числа ошибок и процента брака;

$K_2$  – сокращение времени выполнения операций;

$K_3$  – стоимость внедрения инструмента;

$K_4$  – простота внедрения инструмента.

Сравнительная характеристика выбранных инструментов по выделенным критериям представлена в табл. 3.

Сравнительная характеристика Lean-инструментов

Таблица 3

Table 3

Comparative characteristics of Lean tools

Критерий	Инструмент				
	Poka-Yoke	Стандартизация работ	5S	Visual Management	КПСЦ
Сокращение числа ошибок и процента брака	<b>Очень высокое</b> – исключает возможность ошибки	<b>Среднее</b> – снижает вариативность исполнения	<b>Высокое</b> – за счет устранения источников ошибок	<b>Высокое</b> – позволяет быстро заметить отклонения	<b>Среднее</b> – за счёт оптимизации процессов
Сокращение времени выполнения операций	<b>Среднее</b> – зависит от специфики деятельности компании	<b>Высокое</b> – исключает лишние действия	<b>Высокое</b> – ускоряет поиск, снижает потери	<b>Среднее</b> – помогает ориентироваться и координироваться	<b>Высокое</b> – устраняются лишние этапы и простои
Стоимость внедрения инструмента	<b>Высокая</b> – возможны доработки оборудования	<b>Низкая</b> – в основном затраты на разработку инструкций	<b>Очень низкая</b> – требует только организационных усилий	<b>Средняя</b> – зависит от типа визуальных средств	<b>Средняя</b> – требует аналитики и вовлечения персонала
Простота внедрения инструмента	<b>Средняя</b> – требует инженерной проработки	<b>Высокая</b> – легко внедряется	<b>Очень высокая</b> – быстро внедряется	<b>Высокая</b> – быстро воспринимается и внедряется	<b>Средняя</b> – требует подготовки и понимания процессов

Далее перейдем к непосредственному выбору наиболее эффективного инструмента «бережливого производства», который будет осуществлен при помощи метода анализа иерархий (МАИ) в среде MS Excel [28].

В данном случае имеются пять альтернатив (пять инструментов «бережливого производства»), которые обозначим  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ , где  $A_1$  – Poka-Yoke,  $A_2$  – Стандартизация работ,  $A_3$  – 5S,  $A_4$  – Visual Management,  $A_5$  – КПСЦ. Кроме того, имеется четыре критерия выбора альтернатив, обозначенные  $K_1, K_2, K_3, K_4$  (сущность данных критериев была описана ранее).

На первом этапе анализа проводится поочередное попарное сравнение всех четырёх альтернатив по критерию  $K_1$ . В результате формируется матрица сравнений  $V^{(1)} = [u_{ij}]$ , где каждый элемент  $u_{ij}$  определяется следующим образом: если альтернатива  $A_i$  не уступает по предпочтительности альтернативе  $A_j$ , то  $u_{ij} = h$ , где  $h$  обозначает степень предпочтения. В противном случае, когда  $A_i$  уступает  $A_j$  по данному критерию, значение элемента матрицы имеет вид  $u_{ij} = 1/h$ .

Таким же образом вычисляем матрицы сравнения  $V_{ij}^{(k)}$  для других критериев, где  $k = 1, 2, 3, 4$ .

Матрицы попарных сравнений альтернатив  $V_{ij}^{(1)}, V_{ij}^{(2)}, V_{ij}^{(3)}, V_{ij}^{(4)}$  представлены на рис. 2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	АЛЬТЕРНАТИВЫ						ВЕКТОР	ВЕС	КРИТЕРИИ				
2	K1	A1	A2	A3	A4	A5				K1	K2	K3	K4
3	A1	1	7	3	3	7			K1	1	3	3	3
4	A2	0,14	1	0,33	0,33	3			K2	0,33	1	0,20	0,33
5	A3	0,33	3	1	3	3			K3	0,33	5	1	3
6	A4	0,33	3	0,33	1	3			K4	0,33	3	0,33	1
7	A5	0,14	0,33	0,33	0,33	1							
8	АЛЬТЕРНАТИВЫ												
9	K2	A1	A2	A3	A4	A5							
10	A1	1	0,33	0,33	1	0,33							
11	A2	3	1	0,33	3	1							
12	A3	3	3	1	7	3							
13	A4	1	1/3	0,14	1	0,33							
14	A5	3	1	0,33	3	1							
15	АЛЬТЕРНАТИВЫ												
16	K3	A1	A2	A3	A4	A5							
17	A1	1	0,14	0,11	0,33	0,33							
18	A2	7	1	0,33	3	3							
19	A3	9	3	1	7	7							
20	A4	3	0,33	0,14	1	1							
21	A5	3	0,33	0,14	1	1							
22	АЛЬТЕРНАТИВЫ												
23	K4	A1	A2	A3	A4	A5							
24	A1	1	1/3	1/9	0,33	1							
25	A2	3	1	0,20	1	3							
26	A3	9	5	1	3	7							
27	A4	3	1	0,33	1	3							
28	A5	1	0,33	0,14	0,33	1							
29	АЛЬТЕРНАТИВЫ												

Рис. 2. Матрицы попарных сравнений критериев и альтернатив  
Fig. 2. Matrices of pairwise comparisons of criteria and alternatives

Отметим, что при попарном сравнении альтернатив мы руководствуемся шкалой сравнений, представленной в табл. 4. Кроме того, опираемся на информацию из табл. 3, которая являлась основополагающей при определении степени предпочтительности альтернатив  $h$ .

Шкала относительной важности альтернатив

Таблица 4

Table 4

Relative Importance Scale of Alternatives

Уровень важности	Степень предпочтительности $h$
Равная важность	1
Умеренное превосходство	3
Существенное превосходство	5
Значительно большее превосходство	7
Абсолютное превосходство	9

Аналогичным образом посредством попарного сравнения значимости критериев формируется матрица сравнений, которая служит основой для вычисления весовых коэффициентов каждого из критериев. Данная матрица представлена на рис. 2 и используется для количественной оценки относительной важности факторов, влияющих на принимаемое решение.

На последующем этапе анализа осуществляется вычисление собственных векторов альтернатив для каждого из рассматриваемых критериев. Для каждой альтернативы  $i$  по критерию  $k$  определяется компонент вектора  $U_i^{(k)}$ , значение которого рассчитывается как среднегеометрическое соответствующих элементов в матрице попарных сравнений, относящихся к данной альтернативе:

$$U_i^{(k)} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n V_{ij}^{(k)}} = \sqrt[n]{V_{i1}^{(k)} \times V_{i2}^{(k)} \times \dots \times V_{in}^{(k)}}. \quad (1)$$

Вычисленное значение компоненты вектора  $U_i^{(k)}$  представлено на рис. 2. Аналогичным образом определяется собственный вектор для матрицы сравнений критериев, представленный на рис. 2. Последующий этап включает нормализацию полученных собственных векторов, в результате которой формируются весовые коэффициенты для каждой альтернативы по отдельным критериям, а также для самих критериев. Итоговые веса представлены на рис. 3.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	АЛЬТЕРНАТИВЫ						ВЕКТОР	ВЕС	КРИТЕРИИ					ВЕКТОР	ВЕС
2	K1	A1	A2	A3	A4	A5			K1	K2	K3	K4			
3	A1	1	7	3	3	7	4,582576	0,56916	K1	1	3	3	3	2,279507	0,46324
4	A2	0,14	1	0,33	0,33	3	0,467138	0,058019	K2	0,33	1	0,20	0,33	0,386097	0,078462
5	A3	0,33	3	1	3	3	1,732051	0,215122	K3	0,33	5	1	3	1,495349	0,303884
6	A4	0,33	3	0,33	1	3	1	0,124201	K4	0,33	3	0,33	1	0,759836	0,154413
7	A5	0,14	0,33	0,33	0,33	1	0,269702	0,033497						4,920789	
8							8,051467								
9	АЛЬТЕРНАТИВЫ														
10	K2	A1	A2	A3	A4	A5									
11	A1	1	0,33	0,33	1	0,33	0,438691	0,061497							
12	A2	3	1	0,33	3	1	1,316074	0,18449							
13	A3	3	3	1	7	3	3,707793	0,519766							
14	A4	1	1/3	0,14	1	0,33	0,354948	0,049757							
15	A5	3	1	0,33	3	1	1,316074	0,18449							
16							7,13358								
17	АЛЬТЕРНАТИВЫ														
18	K3	A1	A2	A3	A4	A5									
19	A1	1	0,14	0,11	0,33	0,33	0,204929	0,021333							
20	A2	7	1	0,33	3	3	2,140695	0,222845							
21	A3	9	3	1	7	7	6,031009	0,627824							
22	A4	3	0,33	0,14	1	1	0,614788	0,063999							
23	A5	3	0,33	0,14	1	1	0,614788	0,063999							
24							9,60621								
25	АЛЬТЕРНАТИВЫ														
26	K4	A1	A2	A3	A4	A5									
27	A1	1	1/3	1/9	0,33	1	0,333333	0,038283							
28	A2	3	1	0,20	1	3	1,158292	0,133029							
29	A3	9	5	1	3	7	5,544443	0,636773							
30	A4	3	1	0,33	1	3	1,316074	0,15115							
31	A5	1	0,33	0,14	0,33	1	0,354948	0,040765							
32							8,707091								

Рис. 3. Собственные векторы и веса альтернатив и критериев  
Fig. 3. Eigenvectors and weights of alternatives and criteria

Вес альтернативы  $i$  по критерию  $k$ , обозначаемый как  $W_i^{(k)}$ , определяется как отношение соответствующего компонента собственного вектора  $U_i^{(k)}$  к сумме всех компонентов собственного вектора, относящегося к данному критерию:

$$W_i^{(k)} = \frac{U_i^{(k)}}{\sum_{j=1}^n U_j^{(k)}} = \frac{U_i^{(k)}}{U_1^{(k)} + U_2^{(k)} + \dots + U_n^{(k)}}. \quad (2)$$

Таким же образом вычисляются и веса критериев, обозначенные  $W_{\text{крит}}^{(k)}$ , где  $k = 1, 2, 3, 4$ . Веса критериев  $W_{\text{крит}}^{(k)}$  представлены на рис. 3.

Рассчитав значения показателей полезности для каждой альтернативы по всем критериям, а также соответствующие веса критериев, возможно вычислить агрегированную функцию полезности для каждой альтернативы. Сопоставляя полученные значения, можно определить оптимальную альтернативу, обладающую максимальным значением функции полезности. Расчёт функции полезности для  $i$ -й альтернативы производится по следующей формуле:

$$F_i = \sum_{k=1}^m W_i^{(k)} \times W_{\text{крит}}^{(k)} = W_i^{(1)} \times W_{\text{крит}}^{(1)} + W_i^{(2)} \times W_{\text{крит}}^{(2)} + \dots + W_i^{(m)} \times W_{\text{крит}}^{(m)}. \quad (3)$$

Рассчитанные функции полезности альтернатив представлены на рис. 4.

Так, на рис. 4 наглядно видно, что функция полезности  $A_1$  равна 0,28 (Рока-Йоке); функция полезности  $A_2$  равна 0,12 (Стандартизация работ); функция полезности  $A_3$  равна 0,42 (5S); функция полезности  $A_4$  равна 0,1 (Visual Management); функция полезности  $A_5$  равна 0,05 (КПСЦ).

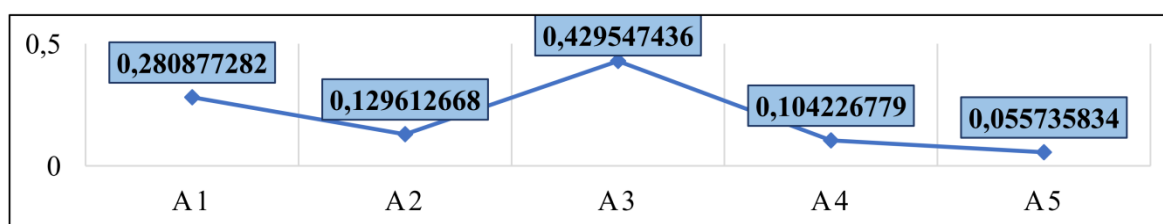


Рис. 4. Функции полезности альтернатив  
Fig. 4. Utility functions of alternatives

Таким образом, можно заключить, что именно методика 5S является оптимальным инструментом, который может быть внедрен с целью повышения операционной эффективности строительного проекта. Это обусловлено следующими факторами:

- удаляются лишние инструменты и материалы, что способствует сокращению путаницы, исключению использования некачественных или неподходящих ресурсов;
- всё имеет своё место: исключаются ошибки из-за беспорядка и снижается время на поиск нужного;
- чистота на рабочем месте способствует упрощению текущего контроля: сотрудникам легче выявить дефекты, утечки, износ. Также снижается и риск загрязнения конструкций.

Помимо прочего, стоит отметить, что данная методика проста во внедрении, а также требует крайне малого объема инвестиций, что особенно актуально для бизнеса в нынешних экономических реалиях.

Также в качестве подтверждения состоятельности данного исследования приведем реальный кейс, подтверждающий эффективность инструмента 5S.

Компания «СтройИнвест», специализирующаяся на возведении жилых и коммерческих объектов, в 2023 году решила внедрить систему 5S на одном из своих строительных объектов с целью повышения эффективности и качества работ.

В ходе данного проекта были достигнуты результаты, среди которых: сокращение времени на поиск инструментов с 15 до 3 мин в среднем и увеличение производительности труда на 20 % за счет оптимизации процессов [29].

Таким образом, еще раз отметим, что данная методика может быть применена в рамках строительного проекта с целью повышения его операционной эффективности.

### **Заключение**

Внедрение Lean-инструментов в строительные проекты представляет собой стратегический подход к повышению операционной эффективности и устойчивости отрасли. Применение принципов бережливого производства, таких как, например, устранение потерь, управление потоками и стандартизация процессов, способствует не только оптимизации ресурсов, но и существенному снижению издержек, времени выполнения работ и улучшению качества на всех этапах реализации проекта.

Исследования показывают, что Lean-инструменты позволяют системно устранить неэффективности, такие как затраты на переделки и простои, что ведёт к значительному повышению общей производительности труда и сокращению времени строительства. Ключевым фактором успеха является комплексный подход, включающий подготовку участников проекта, внедрение механизмов постоянного улучшения и создание среды для эффективного взаимодействия.

В долгосрочной перспективе внедрение Lean-инструментов в строительные проекты способствует не только улучшению финансовых и временных показателей, но и укреплению конкурентоспособности компаний, обеспечивая их более высокую адаптивность в условиях динамично меняющейся внешней среды.

### **Список литературы**

1. Аверина Т.А., Пелихова А.С. Применение Lean-инструментов на различных этапах жизненного цикла строительного проекта // Методы, модели и алгоритмы поддержки принятия решений при управлении организационными системами: материалы I Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2025. С. 12–16.
2. Умное управление проектами: учеб. пособие / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, Я.Д. Гельруд и др.: под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2019. 189 с.
3. Математические методы и модели управления проектами: учеб. пособие / И.В. Буркова, Я.Д. Гельруд, О.В. Логиновский, А.Л. Шестаков. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2018. 193 с.
4. Аверина Т.А. О применении цифровых двойников в управлении различными функциональными областями строительных проектов // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сб. науч. тр. М., 2024. С. 3291–3294.
5. Бережливое производство. Повышаем эффективность в кризис // Дзен: сайт. URL: [https://dzen.ru/a/YlmNAoJiXibcZ\\_hG](https://dzen.ru/a/YlmNAoJiXibcZ_hG) (дата обращения: 01.07.2025).

6. Производительность труда в стройотрасли показывает наименьший рост – эксперт // Интерфакс: сайт. URL: <https://www.interfax-russia.ru/realty/news/proizvoditelnost-truda-v-stroyotrasli-pokazyvaet-naimenshiy-rost-ekspert> (дата обращения: 01.07.2025).
7. Статистика // Коммерсантъ: сайт. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6296003#:~:text=По%20итогам%202022%20года%2C%20по%20данным%20Росстата%2C,строительных%20компаний%20в%20национальный%20проект%20«Производительность%20труда»> (дата обращения: 01.07.2025).
8. Производительность труда в российской стройотрасли в три раза уступает США // Normacs: сайт. URL: <https://www.normacs.info/news/76379> (дата обращения: 01.07.2025).
9. Работать над числом и умением // За-Строй.РФ: сайт. URL: <https://zsrfr.ru/directway/rabotatnad-chislom-i-umeniem> (дата обращения: 01.07.2025).
10. Нехватка специалистов в строительстве: какие профессии в дефиците? // Все о стройке: сайт. URL: <https://xn--b1agapfwapgc1.xn--p1ai/nehvatka-specialistov-v-stroitelstve-kakie-professii-v-deficite/#> (дата обращения: 01.07.2025).
11. Labor Productivity and Lean Construction // 4castsplus: сайт. URL: <https://4castplus.com/labor-productivity-and-lean-construction/> (дата обращения: 01.07.2025).
12. Жукова Ю.А. Бережливое строительство как инновационный метод управления строительством // Вектор научной мысли. 2023. № 5 (5). С. 199–202.
13. Управление строительным комплексом / Т.А. Аверина, С.А. Баркалов, Е.В. Баутина и др.; под общ. ред. С.А. Баркалова. М.: Изд-во ООО «Ритм», 2024. 456 с.
14. Project Management Institute (PMI). Pulse of the Profession Report: Beyond Agility. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2021. 40 p. URL: <https://www.pmi.org/learning/thought-leadership/pulse> (дата обращения: 01.07.2025).
15. Bryde D., Broquetas M., Volm, J.M. The project benefits of Building Information Modeling (BIM) // International Journal of Project Management. 2013. Vol. 31 (7). P. 971–980. DOI: 10.1016/j.ijproman.2012.12.001
16. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry // Leadership & Management in Engineering. 2011. Vol. 11 (3). P. 241–252. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127
17. Юшкин И.И., Аламиди Ш.Г., Сташевская Н.А. Проблемы и преимущества внедрения BIM на предприятиях строительной отрасли // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18, № 2. С. 172–181. DOI: 10.22363/1815-5235-2022-18-2-172-181
18. Osipova E., Eriksson P.E. Balancing control and flexibility in joint risk management: Lessons learned from two construction projects // International Journal of Project Management. 2013. Vol. 31, no. 3. P. 391–399. DOI: 10.1016/j.ijproman.2012.09.007
19. Zou P.X.W., Zhang G., Wang J.-Y. Understanding the key risks in construction projects in China // International Journal of Project Management. 2007. Vol. 25, no. 6. P. 601–614. DOI: 10.1016/j.ijproman.2007.03.001
20. Селиванова А.С., Платонов А.М. Мотивация персонала как инструмент проектного управления в девелопменте // Весенние дни науки: сб. докл. междунар. конф. студентов и молодых ученых. Екатеринбург, 2023. С. 920–922.
21. Эсетова А.М., Абдулкеримова З.Б. Особенности применения методов проектного управления в строительстве // Региональные проблемы преобразования экономики. 2019. № 6 (104). С. 17–24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-primeneniya-metodov-proektnogo-upravleniya-v-stroitelstve> (дата обращения: 03.07.2025).
22. Антикризисное бережливое производство // PROКачество. URL: <https://kachestvo.pro/kachestvo-upravleniya/berezhlivoe-proizvodstvo/antikrizisnoe-berezhlivoe-proizvodstvo/> (дата обращения: 03.07.2025).
23. Смирнов С.А., Сорокин Г.С. Применение бережливого производства в российских компаниях // Евразийская интеграция: экономика, право, политика. 2022. Т. 16, № 4 (42). С. 55–67. DOI: 10.22394/2073-2929-2022-04-55-67. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-berezhlivogo-proizvodstva-v-rossiyskih-kompaniyah> (дата обращения: 03.07.2025).
24. Контроль качества во время строительства: что и как // SGS: сайт. URL: [https://www.sgs.com/ru-az/news/2022/12/kontrol-kachestva-v-hode-stroitelstva-zachem-i-kak?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.sgs.com/ru-az/news/2022/12/kontrol-kachestva-v-hode-stroitelstva-zachem-i-kak?utm_source=chatgpt.com) (дата обращения: 03.07.2025).

25. Современные проблемы качества контроля СМР // PlanRadar: сайт. URL: <https://www.planradar.com/cis/sovremennye-problemy-kontrolya-kachestva-stroitelnyh-rabot/> (дата обращения: 27.04.2025).
26. Башарин А.Д. Проблемы организации контроля качества на строительной площадке // Молодой ученый. 2023. № 24 (471). С. 154–157.
27. Вагин М.С. Тенденции развития инструментов бережливого производства // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2024. № 10. С. 149–155. DOI: 10.24412/2220-2404-2024-10-4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-razvitiya-instrumentov-berezhlivogo-proizvodstva> (дата обращения: 04.07.2025).
28. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Насонова Т.В. Математические методы проведения экспертной оценки качественных показателей: Управление строительством. 2018. № 2 (11). С. 6–35.
29. Мокрополов В.Д. Стратегии и инструменты для реализации бережливого производства // Наука и образование сегодня. 2024. № 2 (79). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strategii-i-instrumenty-dlya-realizatsii-berezhlivogo-proizvodstva> (дата обращения: 04.07.2025).

### References

1. Averina T.A., Pelikhova A.S. [Application of Lean tools at various stages of the life cycle of a construction project]. In: *Metody, modeli i algoritmy podderzhki prinyatiya resheniy pri upravlenii organizatsionnymi sistemami. Materialy I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Methods, models and algorithms for decision support in managing organizational systems. Proceedings of the I International scientific and practical conference]. Voronezh, 2025. P. 12–16. (In Russ.)
2. Barkalov S.A., Burkov V.N., Gelrud Ya.D. et al. *Umnoe upravlenie proektami: uchebnoe posobie* [Smart project management: a tutorial]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ., 2019. 189 p. (In Russ.)
3. Burkova I.V., Gel'rud Ya.D., Loginovskiy O.V., Shestakov A.L. *Matematicheskie metody i modeli upravleniya proektami: uchebnoe posobie* [Mathematical Methods and Models of Project Management: A Tutorial]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ., 2018. 193 p. (In Russ.)
4. Averina T.A. [On the use of digital twins in the management of various functional areas of construction projects]. In: *XIV Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya: sbornik nauchnykh trudov* [XIV All-Russian conference on management problems. Collection of scientific papers]. Moscow, 2024. P. 3291–3294. (In Russ.)
5. *Berezhlivoe proizvodstvo. Povyshaem effektivnost' v krizis* [Lean manufacturing. Increasing efficiency in a crisis]. Dzen: website. (In Russ.) Available at: [https://dzen.ru/a/YlmNAoJiXibcZ\\_hG](https://dzen.ru/a/YlmNAoJiXibcZ_hG) (accessed 01.07.2025).
6. *Proizvoditel'nost' truda v stroyotrasli pokazyvaet naimen'shiy rost – ekspert* [Labor productivity in the construction industry shows the least growth – expert]. Interfax: website. (In Russ.) Available at: <https://www.interfax-russia.ru/realty/news/proizvoditelnost-truda-v-stroyotrasli-pokazyvaet-naimenshiy-rost-ekspert> (accessed 01.07.2025).
7. *Statistika* [Statistics]. Kommersant: website. (In Russ.) Available at: [https://www.kommersant.ru/doc/6296003#:~:text=According to the results of 202022, according to Rosstat, construction companies participated in the national project "Labor Productivity"](https://www.kommersant.ru/doc/6296003#:~:text=According to the results of 202022, according to Rosstat, construction companies participated in the national project \) (accessed 01.07.2025).
8. *Proizvoditel'nost' truda v rossiyskoy stroyotrasli v tri raza ustupaet SShA* [Labor productivity in the Russian construction industry is three times lower than in the United States]. Normacs: website. (In Russ.) Available at: <https://www.normacs.info/news/76379> (accessed 01.07.2025).
9. *Rabotat' nad chislom i umeniem* [Work on numbers and skills]. Za-Stroy.RF: website. (In Russ.) Available at: <https://zsrf.ru/directway/rabotat-nad-chislom-i-umeniem> (accessed 01.07.2025).
10. *Nekhvatka spetsialistov v stroitel'stve: kakie professii v defitsite?* [Shortage of specialists in construction: what professions are in short supply?]. Vse o stroyke: website. (In Russ.) Available at: <https://xn--b1agapfwapgcl.xn--p1ai/nehvatka-specialistov-v-stroitelstve-kakie-professii-v-deficite/#> (accessed 01.07.2025).
11. Labor Productivity and Lean Construction. 4castsplus: website. Available at: <https://4castplus.com/labor-productivity-and-lean-construction/> (accessed 01.07.2025).

12. Zhukova Yu.A. Lean construction as an innovative method of construction management. *Vektor nauchnoy mysli*. 2023;5(5):199–202. (In Russ.)
13. Averina T.A., Barkalov S.A., Bautina E.V., Karpovich M.A., Mailyan L.D., Serebryakova E.A., Shevchenko L.V. *Upravlenie stroitel'nyim kompleksom* [Construction complex management]. Moscow: LLC "Ritm" Publ., 2024. 456 p. (In Russ.)
14. Project Management Institute (PMI). Pulse of the Profession Report: Beyond Agility. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2021. 40 p. Available at: <https://www.pmi.org/learning/thought-leadership/pulse> (accessed 01.07.2025).
15. Bryde D., Broquetas M., Volm, J.M. The project benefits of Building Information Modeling (BIM). *International Journal of Project Management*. 2013;31(7):971–980. DOI: 10.1016/j.ijproman.2012.12.001
16. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership & Management in Engineering*. 2011;11(3):241–252. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127
17. Iushkin I.I., Alamedy S.G., Stashevskaya N.A. Problems and benefits of implementing BIM in the construction industry. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(2):172–181. (In Russ.) DOI: 10.22363/1815-5235-2022-18-2-172-181
18. Osipova E., Eriksson P.E. Balancing control and flexibility in joint risk management: Lessons learned from two construction projects. *International Journal of Project Management*. 2013;31(3):391–399. DOI: 10.1016/j.ijproman.2012.09.007
19. Zou P.X.W., Zhang G., Wang J.-Y. Understanding the key risks in construction projects in China. *International Journal of Project Management*. 2007;25(6):601–614. DOI: 10.1016/j.ijproman.2007.03.001
20. Selivanova A.S., Platonov A.M. [Personnel motivation as a project management tool in development]. In: *Vesenniye dni nauki: sb. dokl. mezhdunar. konf. studentov i molodykh uchenykh* [Spring Science Days. Collection of papers from the international conference of students and young scientists]. Ekaterinburg, 2023. P. 920–922. (In Russ.)
21. Esetova A.M., Abdulkirimova Z.B. Features of application of methods of design management in construction. *Regional problems of transforming the economy*. 2019;6(104):17–24. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-primeneniya-metodov-proektnogo-upravleniya-v-stroitelstve> (accessed 03.07.2025).
22. *Antikrizisnoe berezhlivoe proizvodstvo* [Anti-crisis lean production]. *PROKachestvo: website*. (In Russ.) Available at: <https://kachestvo.pro/kachestvo-upravleniya/berezhlivoe-proizvodstvo/antikrizisnoe-berezhlivoe-proizvodstvo/> (accessed 03.07.2025).
23. Smirnov S.A., Sorokin G.S. Implementation of lean manufacturing methods in Russian companies. *Eurasian Integration: Economics, Law, Politics*. 2022;16(4(42)):55–67. (In Russ.) DOI: 10.22394/2073-2929-2022-04-55-67. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-berezhlivogo-proizvodstva-v-rossiyskih-kompaniyah> (accessed 03.07.2025).
24. *Kontrol' kachestva vo vremya stroitel'stva: chto i kak* [Quality Control During Construction: What and How]. *SGS: website*. (In Russ.) Available at: [https://www.sgs.com/ru-az/news/2022/12/kontrol-kachestva-v-hode-stroitelstva-zachem-i-kak?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.sgs.com/ru-az/news/2022/12/kontrol-kachestva-v-hode-stroitelstva-zachem-i-kak?utm_source=chatgpt.com) (accessed 03.07.2025).
25. *Sovremennye problemy kachestva kontrolya SMR* [Modern problems of quality control of construction and assembly works]. *PlanRadar: website*. (In Russ.) Available at: <https://www.planradar.com/cis/sovremennye-problemy-kontrolya-kachestva-stroitelnyh-rabot/> (accessed 27.04.2025).
26. Basharin A.D. [Problems of organizing quality control at a construction site]. *Young scientist*. 2023;24(471):154–157. (In Russ.)
27. Vagin M.S. Trends in the development of lean manufacturing tools. *Humanities, social-economic and social sciences*. 2024;(10):149–155. (In Russ.) DOI: 10.24412/2220-2404-2024-10-4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-razvitiya-instrumentov-berezhlivogo-proizvodstva> (accessed 04.07.2025).
28. Barkalov S.A., Moiseev S.I., Nasonova T.V. Expert evaluation mathematical methods of quality indicators. *Upravleniye stroitel'stvom*. 2018;2(11):6–35. (In Russ.)
29. Mokropolov V.D. [Strategies and Tools for the Implementation of Lean Manufacturing]. *Science and Education Today*. 2024;2(79). (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/strategii-i-instrumenty-dlya-realizatsii-berezhlivogo-proizvodstva> (accessed 04.07.2025)

***Информация об авторах***

**Баркалов Сергей Алексеевич**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, декан факультета экономики, менеджмента и инновационных технологий, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sbarkalov@nm.ru.

**Аверина Татьяна Александровна**, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; ta\_averina@mail.ru.

**Пелихова Анастасия Сергеевна**, магистрант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; anastasiapelihova004@gmail.com.

***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 Innovation Technologies, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sbarkalov@nm.ru.

**Tatiana A. Averina**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; ta\_averina@mail.ru.

**Anastasia S. Pelikhova**, Master's student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; anastasiapelihova004@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 30.06.2025***

***The article was submitted 30.06.2025***

## ФОРМИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ МЕТОДОЛОГИИ ВНЕДРЕНИЯ ERP-СИСТЕМ ДЛЯ МАЛЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ РОССИИ

**О.Л. Голубева**, [golubeva.ol@mail.ru](mailto:golubeva.ol@mail.ru)

**А.В. Голлай**, [gollaiav@susu.ru](mailto:gollaiav@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

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

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Инкрементная стратегия внедрения ERP-систем обладает рядом преимуществ для малых предприятий, таких как снижение единовременных затрат, постепенное обучение персонала и поэтапная миграция данных. Тем не менее, несмотря на очевидную привлекательность, существующие методологии внедрения ERP-систем часто недостаточно адаптированы к особенностям малого бизнеса, что снижает эффективность инкрементного подхода. Большинство зарубежных и российских методологий ориентировано либо на крупные предприятия, либо на линейную модель внедрения без учета инкрементных подходов. **Цель исследования.** Настоящая статья направлена на разработку гибридной методологии инкрементного внедрения ERP-систем на платформе 1С, учитывающей специфику малых предприятий. **Материалы и методы.** В работе использован сравнительный анализ зарубежных (SAP Activate, Microsoft Sure Step, Oracle Unified Method) и российских (1С:ТСВ, 1С:ТБР, 1С:ТКВ) методологий внедрения ERP на платформе 1С. **Результаты.** В результате исследования разработана методология 1С:Инкрементное стандартное внедрение (1С:ИСВ), основанная на постепенном запуске ERP-системы по инкрементам. Методология включает построение MVP, поэтапную миграцию данных, модульное обучение пользователей и итеративные улучшения. Также учтены лучшие подходы зарубежных методологий: использование типовых бизнес-сценариев, принципы управления качеством и назначение лидеров изменений. **Заключение.** Предложенная методология 1С:ИСВ может быть использована как практическая основа для реализации инкрементных проектов внедрения ERP на малых предприятиях, что будет способствовать повышению устойчивости проектов, снижению рисков и более эффективной адаптации системы под нужды бизнеса.

**Ключевые слова:** ERP-системы, внедрение ERP, инкрементная стратегия, методология внедрения, управление проектом

**Для цитирования:** Голубева О.Л., Голлай А.В., Логиновский О.В. Формирование гибридной методологии внедрения ERP-систем для малых предприятий России // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 4. С. 83–95. DOI: 10.14529/ctcr250406

Original article  
DOI: 10.14529/ctcr250406

## DEVELOPMENT OF A HYBRID ERP IMPLEMENTATION METHODOLOGY FOR SMALL ENTERPRISES IN RUSSIA

**O.L. Golubeva**, [golubeva.ol@mail.ru](mailto:golubeva.ol@mail.ru)

**A.V. Hollay**, [gollaiav@susu.ru](mailto:gollaiav@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

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

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The incremental strategy of ERP system implementation offers a number of advantages for small enterprises, such as reducing upfront costs, providing gradual staff training, and enabling step-by-step data migration. Nevertheless, despite its apparent attractiveness, existing ERP implementation methodologies are often insufficiently adapted to the specific needs of small businesses, which reduces the effectiveness of the incremental approach. Most foreign and Russian methodologies are designed either for large

enterprises or follow a linear implementation model without considering incremental strategies. **The aim of the study.** This article aims to develop a hybrid methodology for incremental ERP implementation on the 1C platform, taking into account the particular characteristics of small enterprises. **Materials and methods.** The study applies a comparative analysis of foreign (SAP Activate, Microsoft Sure Step, Oracle Unified Method) and Russian ERP implementation methodologies on the 1C platform. **Results.** As a result of the study, a methodology called 1C: Incremental Standard Implementation was developed, based on the gradual launch of the ERP system in increments. The methodology incorporates the construction of an MVP, staged data migration, modular user training, and iterative improvements. It also integrates best practices from international methodologies, such as the use of standard business scenarios, quality management principles, and the appointment of change leaders. **Conclusion.** The proposed 1C methodology can serve as a practical foundation for carrying out incremental ERP implementation projects in small enterprises. It is expected to enhance project sustainability, reduce risks, and achieve more efficient system adaptation to business needs.

**Keywords:** ERP systems, ERP implementation, phased strategy, implementation methodology, project management

**For citation:** Golubeva O.L., Hollay A.V., Loginovskiy O.V. Development of a hybrid ERP implementation methodology for small enterprises in Russia. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(4):83–95. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250406

## Введение

Инкрементная стратегия (поэтапная стратегия, инкрементный подход, phased implementation, wave deployment) – это управленческий подход к реализации новых решений, при котором изменения внедряются постепенно, поэтапно, с последовательным добавлением функциональности или компонентов [1]. Основной принцип инкрементной стратегии заключается в том, что финальный продукт создается по частям – через серию небольших, управляемых улучшений (инкрементов). Такие инкременты могут представлять собой отдельные модули, функции, бизнес-процессы или организационные изменения, для которых осуществляется контроль внедрения, оценка результата и корректировка проекта при необходимости.

В отличие от радикальных, одномоментных изменений (революционных подходов), инкрементный подход ориентирован на постепенное развитие и адаптацию, что позволяет минимизировать риски, обеспечить более высокую устойчивость системы и скорректировать ошибки на ранних этапах их появления. В то же время инкрементная стратегия может потребовать большего времени на полноценную реализацию проекта, а также четкой координации персонала и тщательного управления зависимостями между этапами.

Во многих исследованиях отмечается, что внедрение ERP на малых предприятиях сопровождается существенными затруднениями. В то время как крупные компании достаточно серьезно относятся к последствиям и рискам внедрения, малые предприятия часто приступают к процессу внедрения, не зная, чего ожидать и как управлять данным процессом [2].

В проектах внедрения ERP-систем использование инкрементных стратегий позволяет вводить систему в эксплуатацию поэтапно, частями, с постепенной интеграцией отдельных модулей, функций или бизнес-направлений [3]. Инкрементная стратегия особенно выгодна для малых предприятий по нескольким причинам.

1. Инкрементная стратегия позволяет избежать крупных единовременных затрат, поскольку бюджет проекта распределяется на более длительный срок. В итоге внедрение становится более доступным при ограниченных финансовых ресурсах [2, 4–8]. Инкрементный подход позволяет равномерно распределять расходы и корректировать их по мере получения промежуточных результатов [9]. Внешних консультантов также можно привлекать по мере необходимости, гибко управляя их загрузкой и соответствующими расходами.

2. Участие в крупномасштабных и технически сложных проектах внедрения ERP-систем требует высокого уровня ИТ-компетенций, которые зачастую отсутствуют у малых предприятий [4, 8, 10–12]. Инкрементная стратегия обеспечивает постепенное обучение и адаптацию сотрудников к новым инструментам на каждом этапе внедрения.



3. В силу недостатка опыта в реализации комплексных IT-проектов [4, 13] малым предприятиям выгоднее использовать инкрементную стратегию, которая облегчает контроль за проектом и делает его реализацию более управляемой за счет распределения во времени и уменьшения объема задач.

4. Инкрементный подход минимизирует сбои в повседневной работе предприятия, так как внедрение системы выполняется небольшими итерациями, что снижает нагрузку на персонал, и так перегруженный операционными задачами [14], и позволяет руководству участвовать в проекте без сильного отрыва от основной деятельности.

5. Малые предприятия, как правило, имеют упрощенную организационную структуру с ограниченным числом уровней управления, благодаря чему решения принимаются быстрее, а изменения можно оперативно согласовывать и внедрять.

### **1. Требования к инкрементной методологии внедрения ERP-систем на малых предприятиях**

Методология внедрения ERP-системы – это структурированный подход, включающий совокупность принципов, методов, этапов и инструментов, предназначенных для планирования, выполнения, мониторинга и завершения проекта по внедрению ERP-системы на предприятии.

Методология внедрения определяет, как именно будет происходить процесс интеграции ERP-системы: какие этапы будет включать проект (например, исследование бизнес-процессов, настройка системы, миграция данных, обучение пользователей, запуск и поддержка), какие сроки и ресурсы требуются и каким образом будет оцениваться успех внедрения.

В соответствии со спецификой малых предприятий инкрементная методология должна поддерживать следующие требования к структуре проекта внедрения ERP-системы:

1) разделение проекта внедрения на последовательность инкрементов, определение границ и результатов каждого инкремента, приоритизация инкрементов;

2) обеспечение функционально-логической связи между отдельными инкрементами: каждый последующий инкремент должен органично расширять возможности системы с учетом существующих зависимостей между данными и бизнес-процессами. Такое требование является обоснованным, поскольку наличие множества этапов внедрения при отсутствии единого архитектурного и проектного плана может привести к дублированию данных, ухудшению интеграции модулей и нарушению целостности бизнес-процессов [15];

3) формирование в начальных инкрементах минимально жизнеспособного продукта (MVP), который позволит компании быстро реализовать ключевые потребности в функционале;

4) четкое распределение ответственности на проекте между участниками (персонал, руководство и консультанты) за определенные аспекты внедрения по инкрементам. Данное требование подчеркивает необходимость учитывать ограниченное число сотрудников малых предприятий и комбинировать внешнюю экспертизу с постепенным формированием внутренних компетенций [16];

5) определение содержания обучения на каждом инкременте и перечня сотрудников, подлежащих обучению, синхронизация обучения с содержанием инкремента. В этом плане инкрементная модель снижает сопротивление персонала, так как позволяет адаптироваться и накапливать компетенции постепенно [9];

6) реализация механизма обратной связи и итеративных улучшений по инкрементам. Благодаря итеративным улучшениям сотрудники малого предприятия получают возможность активно вовлекаться на всех этапах: от определения требований до выбора подрядчика, что снизит сопротивление изменениям и повысит вовлеченность [17];

7) обеспечение параллельной работы и синхронизации предшествующей и новой системы, определение границ использования предшествующей системы на каждом инкременте, определение порядка переключения оборудования и сервисов, определение необходимых действий для поддержки предшествующей системы на каждом инкременте. Данное требование является следствием того, что при инкрементном внедрении модули новой ERP-системы долгое время работают параллельно со старыми процессами или системами, что может без должного контроля привести к дублированию данных, ошибкам и рассинхронизации [16];

8) определение порядка миграции данных и бизнес-процессов из предшествующих систем, распределение этапов миграции по инкрементам.

## 2. Анализ и сравнение зарубежных методологий внедрения ERP-систем в части инкрементного подхода

Проанализируем и сравним наиболее известные и востребованные зарубежные методологии внедрения ERP-систем в части поддержки инкрементного подхода (табл. 1).

### 1. SAP Activate

Методология SAP Activate [18] – это современный подход к внедрению SAP-решений, пришедший на смену устаревшей методологии ASAP. Она предназначена для быстрого, гибкого и управляемого внедрения решений SAP, особенно в контексте SAP S/4HANA, SAP Cloud Platform и других облачных продуктов.

Методология SAP Activate изначально проектировалась как модульная, гибкая и совместимая с Agile-принципами, она не только допускает, но и поощряет реализацию SAP в виде независимых, управляемых циклов, каждая из которых имеет конкретную цель, команду и измеряемый результат.

### 2. Microsoft Sure Step

Методология Microsoft Sure Step [19] – это структурированный подход к внедрению бизнес-приложений Microsoft Dynamics, таких как Dynamics 365 (ранее Dynamics AX, NAV, GP, CRM). Sure Step охватывает как классические ERP-внедрения, так и проекты миграции, обновления, оптимизации и технической поддержки. Дорожная карта Sure Step направлена на эффективное планирование, реализацию и поддержку ERP- и CRM-решений.

Методология Microsoft Sure Step, в отличие от SAP Activate была изначально ориентирована на каскадный подход, то есть последовательное прохождение всех этапов от анализа до эксплуатации. Однако начиная с расширения Sure Step Agile Model, выпущенного в 2010 году, методология стала поддерживать итеративную модель и возможность инкрементного внедрения.

### 3. Oracle Unified Method (OUM)

Методология Oracle Unified Method (OUM) [20] – это универсальный гибкий фреймворк, разработанный Oracle для поддержки полного жизненного цикла внедрения ИТ-решений, включая ERP-системы, бизнес-приложения Oracle E-Business Suite, Oracle Cloud Applications, PeopleSoft, JD Edwards и другие. OUM охватывает как внедрение «с нуля», так и проекты миграции, интеграции, масштабирования и сопровождения.

Методология Oracle Unified Method изначально проектировалась как адаптивная, поэтапная и модульная и потому полностью поддерживает инкрементный подход к внедрению ERP-систем и позволяет запускать каждый инкремент / модуль / релиз как отдельный блок с собственным жизненным циклом.

Все три рассмотренные методологии – Microsoft Sure Step, SAP Activate и Oracle Unified Method – так или иначе поддерживают инкрементный подход, однако степень зрелости, интегрированности и готовности к имплементации отдельных активностей существенно различаются.

В основе SAP Activate лежит принцип итеративного внедрения: методология специально спроектирована под разбиение системы на готовые, стандартизированные бизнес-сценарии (scope items), которые детально представлены в библиотеке SAP Best Practices. Такие стандартизированные бизнес-сценарии содержат подробное описание бизнес-процесса или его части, учебные материалы и зависимости с другими сценариями. На основании таких сценариев можно формировать и приоритизировать инкременты, в том числе формируя MVP на ранних этапах проекта. SAP Activate – единственная из трех методологий, где инкрементное внедрение заложено в саму основу и может использоваться без дополнительных настроек.

Методология Microsoft Sure Step исторически ориентирована на проекты с единовременным переходом, опирается на каскадные фазы проекта и не предусматривает MVP на начальных этапах. Обучение также планируется только в конце, перед переходом в продуктивную эксплуатацию. Sure Step использует волны миграции, но это элементы технической подготовки данных, а не полноценная работа с функциональными инкрементами. Поэтому ее можно считать наименее гибкой из трех методологий в части инкрементного внедрения.

Oracle Unified Method представляет собой более универсальную методологию. Она построена итеративно и поддерживает возможность создания жизнеспособного решения (Viable Solution, аналог MVP) на ранних итерациях и расширять его шаг за шагом. Также методология обеспечивает управление зависимостями, описание бизнес-процессов и обратную связь после каждой итерации. Однако в отличие от SAP Activate, обучение по инкрементам и поэтапное внедрение на-

прямую не зафиксированы в OUM: их приходится добавлять вручную, настраивая проект под конкретные требования. То есть по своей природе OUM поддерживает итеративность и инкременты, но требует гораздо больше гибкости и квалификации со стороны проектной команды, чтобы превратить инкрементное внедрение в системный процесс.

Таблица 1

Сравнение зарубежных методологий внедрения ERP-систем  
в части поддержки инкрементного подхода

Table 1

Comparison of foreign ERP implementation methodologies  
in terms of support for the incremental approach

Критерий	SAP Activate	Microsoft Sure Step	Oracle Unified Method (OUM)
Разделение проекта на инкременты	<b>Полностью соответствует:</b> проект разбивается на релизы / спринты и отдельные бизнес-процессы (Product Backlog)	<b>Частично соответствует:</b> деление на фазы и волны, но без полноценных инкрементов	<b>Полностью соответствует:</b> итеративная модель с приоритизацией по бизнес-ценности
Функционально-логическая связь между инкрементами	<b>Полностью соответствует:</b> функциональные возможности связаны в сквозные сценарии (SAP Best Practices); взаимосвязь между процессами явно фиксируется в дорожной карте и Product Backlog	<b>Частично соответствует:</b> процессные карты (BPM) отражают взаимосвязи, но не являются встроенным механизмом для управления инкрементами	<b>Полностью соответствует:</b> используются BPM для управления зависимостями
MVP на ранних этапах	<b>Полностью соответствует:</b> формирование MVP в первых инкрементах	<b>Частично соответствует:</b> только ручная настройка при помощи Agile-спринтов	<b>Полностью соответствует:</b> формирование MVP (Viable Solution) в первых инкрементах
Распределение ответственности	<b>Полностью соответствует:</b> стандартные роли и матрицы RACI	<b>Частично соответствует:</b> роли определены и распределены по фазам внедрения, но не инкрементам	<b>Полностью соответствует:</b> четко определенные роли, используется аналог матриц RACI
Обучение по инкрементам	<b>Полностью соответствует:</b> поэтапная подготовка пользователей в соответствии с релизом	<b>Не соответствует:</b> план обучения, привязанный к фазе развертывания	<b>Частично соответствует:</b> основное обучение планируется в фазе перехода, но можно построить по итерациям
Обратная связь и итеративные улучшения	<b>Полностью соответствует:</b> Agile-сессии со сбором обратной связи	<b>Полностью соответствует:</b> Agile-спринты	<b>Полностью соответствует:</b> итеративная адаптация решения
Параллельная работа с предшествующей системой	<b>Частично соответствует:</b> определение границ использования и порядка отключения предшествующих систем; требует ручной настройки	<b>Не соответствует:</b> только ручная настройка	<b>Не соответствует:</b> только ручная настройка
Миграция данных по этапам	<b>Полностью соответствует:</b> поэтапные миграционные волны (waves)	<b>Не соответствует:</b> миграция данных по циклам тестирования, но не инкрементам	<b>Не соответствует:</b> волны миграции только при тестовой загрузке

### 3. Анализ и сравнение российских методологий внедрения ERP-систем в части инкрементного подхода

Зарубежные методологии внедрения ERP-систем тесно увязаны с конкретными программными продуктами, на базе которых создавались и применялись. Каждая из таких методологий предполагает использование определенной логики настройки, набора инструментов и архитектурных решений, характерных именно для соответствующей системы. На практике это означает, что все ключевые процессные карты, шаблоны, процедуры миграции данных и организационные подходы подразумевают реализацию в рамках конкретного программного решения, будь то SAP, Oracle или другие крупные ERP.

При попытке перенести эти практики на российскую платформу 1С неизбежно возникает несоответствие: структура конфигурирования отличается, бизнес-процессы моделируются и реализуются иным образом, интерфейсы и механизмы интеграции имеют собственную специфику. В результате прямое использование зарубежных методологий оказывается невозможным, поскольку без адаптации под архитектуру и функциональную логику 1С они теряют свою применимость и перестают быть эффективными инструментами внедрения. Таким образом, внедрение 1С в России требует разработки или адаптации собственных методологических подходов, ориентированных на местные бизнес-практики и особенности платформы.

Рассмотрим подробно три основные российские методологии внедрения, которые разработаны фирмой 1С под особенности российской платформы.

#### 1. 1С:Технология Стандартного Внедрения (1С:ТСВ)

Методология предназначена для типовых проектов внедрения, когда компания заказчика использует стандартные функции 1С:Предприятия без серьезных доработок:

- включает базовые этапы: предварительное обследование бизнеса, установка и настройка типовой конфигурации, обучение пользователей, опытная эксплуатация и переход в промышленный режим;
- основана на пошаговом переходе от обследования до запуска (каскадное внедрение);
- подразумевает использование стандартных справочников, форм документов и отчетности без существенного изменения прикладного решения;
- основной целью является быстрое внедрение с минимальными трудозатратами и относительно небольшим бюджетом.

Методология подходит для малых и средних организаций, деятельность которых соответствует логике типовых решений 1С.

#### 2. 1С:Технология Быстрого Результата (1С:ТБР)

Методология ориентирована на получение бизнес-эффекта в кратчайшие сроки:

- внедрение начинается с наиболее приоритетных задач компании (например, бухгалтерский или налоговый учет, расчет зарплаты, отдельный участок управленческого учета);
- реализация строится по принципу «точечного запуска» – сначала вводятся ключевые блоки системы для решения наиболее острых проблем, а уже потом постепенно расширяется функциональность;
- методология допускает уменьшение глубины предварительного обследования, акцент смещен на практические действия и оперативное обучение пользователей;
- важным элементом являются краткосрочные итерации, после каждой из которых заказчик получает работающий результат.

Методология эффективна для компаний, которым нужен быстрый запуск отдельного блока системы, а менее критичные задачи могут быть реализованы позднее.

#### 3. 1С:Технология Корпоративного Внедрения (1С:ТКВ)

Методология разработана для крупных организаций и холдингов, где внедрение системы связано с множеством пользователей, распределенной структурой и разнообразными требованиями:

- основой служит проектный подход с четким управлением сроками, бюджетом, рисками и взаимодействием проектных команд;
- внедрение начинается с детального обследования, формирования концептуальной модели, составления технического задания и план-графика проекта;
- методология включает систему документооборота проекта, регламент коммуникаций, управление изменениями и тестирование;
- допускает использование как типовых решений, так и глубокой кастомизации с разработкой уникальных модулей под заказчика;

– центральное внимание уделяется управлению качеством: контролю промежуточных результатов, регулярной отчетности и поэтапному вводу функциональности.

Методология подходит для крупных предприятий, где важно обеспечить управляемость и прозрачность сложного проекта.

Можно видеть, что для малых предприятий предполагается использовать 1С:ТВС или 1С:ТБР, а 1С:ТКВ ориентирована на крупный бизнес. При этом 1С:Технология Стандартного Внедрения предлагает быстрое внедрение типового решения, что обеспечивает сокращение затрат и высокую автоматизацию процесса внедрения, но предоставляет минимальную гибкость при выборе функционала и имеет высокие риски перегрузить сотрудников новой информацией. В свою очередь 1С:Технология Быстрого Результата, напротив, обладает максимальной гибкостью и позволяет разделить проект на отдельные этапы, но потребует увеличения бюджета внедрения и времени работы консультантов по приоритизации и поэтапному запуску. Что касается методологии 1С:Технология Корпоративного Внедрения, то она является наиболее дорогим и организационно сложным вариантом, который потребует привлечения профессиональной команды внедрения.

Сравнение соответствующих методологий внедрения в части поддержки инкрементного подхода представлено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение методологий внедрения 1С  
в части поддержки инкрементного подхода

Table 2

Comparison of 1C implementation methodologies  
in terms of support for the incremental approach

Критерий	ТСВ	ТБР	ТКВ
Разделение проекта на инкременты	<b>Не соответствует:</b> предполагает линейный сценарий, чаще всего целевая система запускается единовременно	<b>Полностью соответствует:</b> ориентирована на инкрементность и поэтапный запуск, приоритизация встроена в саму логику методологии	<b>Полностью соответствует:</b> предполагает поэтапный ввод функционала и закрепление инкрементов в план-графике
Функционально-логическая связь между инкрементами	<b>Не соответствует:</b> не представлена ввиду отсутствия разделения на инкременты	<b>Частично соответствует:</b> связь между инкрементами учитывается, но в упрощенной форме (основной целью является запуск критичных бизнес-процессов)	<b>Полностью соответствует:</b> высокий уровень формализации зависимости бизнес-процессов и данных, каждый инкремент структурирован так, чтобы логично расширять уже существующую систему
MVP на ранних этапах	<b>Не соответствует:</b> целью является запуск стандартного решения целиком, MVP не выделяется	<b>Полностью соответствует:</b> методология построена на принципе MVP	<b>Полностью соответствует:</b> MVP возможен и обычно включается в проект как «первый этап промышленной эксплуатации» или «первый релиз», но обязательно в рамках утвержденной дорожной карты
Распределение ответственности	<b>Частично соответствует:</b> роли назначаются, но обычно в рамках одного этапа	<b>Полностью соответствует:</b> ответственность разделяется по каждому функциональному блоку, но документальной проработки меньше, чем в крупных проектах	<b>Полностью соответствует:</b> строгое разграничение, матрица ответственности (RACI) формируется и фиксируется по каждому инкременту

Критерий	ТСВ	ТБР	ТКВ
Обучение по инкрементам	<b>Не соответствует:</b> обучение проводится один раз перед запуском системы	<b>Полностью соответствует:</b> обучение тесно связано с инкрементами и проводится сразу после запуска нового блока	<b>Полностью соответствует:</b> обучение планируется как отдельный поток проекта, синхронизируется с внедрением функционала каждого инкремента
Обратная связь и итеративные улучшения	<b>Частично соответствует:</b> обратная связь присутствует, но чаще всего в виде корректировок после опытной эксплуатации всей системы	<b>Полностью соответствует:</b> после каждого мини-запуска пользователи дают отзывы, вносятся итеративные улучшения	<b>Полностью соответствует:</b> каждое улучшение фиксируется в планах и контролируется проектным офисом
Параллельная работа с предшествующей системой	<b>Не соответствует:</b> предшествующая система отключается сразу после перехода	<b>Частично соответствует:</b> допускается параллельное использование на отдельных участках, но преимущественно краткосрочно	<b>Полностью соответствует:</b> детально прорабатывается схема параллельной эксплуатации, определяются сроки, порядок переключения и поддержка старой системы на каждом инкременте
Миграция данных по этапам	<b>Не соответствует:</b> миграция осуществляется, как правило, единовременно	<b>Частично соответствует:</b> сначала переносятся данные только для выбранного блока (например, бухгалтерский учет), остальные подтягиваются позже	<b>Полностью соответствует:</b> миграция распределяется по релизам / инкрементам и может идти параллельно с обучением

1С:ТСВ минимально соответствует принципам инкрементного внедрения. Методология изначально ориентирована на линейный запуск системы в полном объеме, без выделения MVP, поэтапного обучения или постепенной миграции данных, что делает ее применимой для проектов с простыми требованиями и небольшой вариативностью процессов, но непрактичной для компаний, где требуется гибкость и адаптация к изменениям.

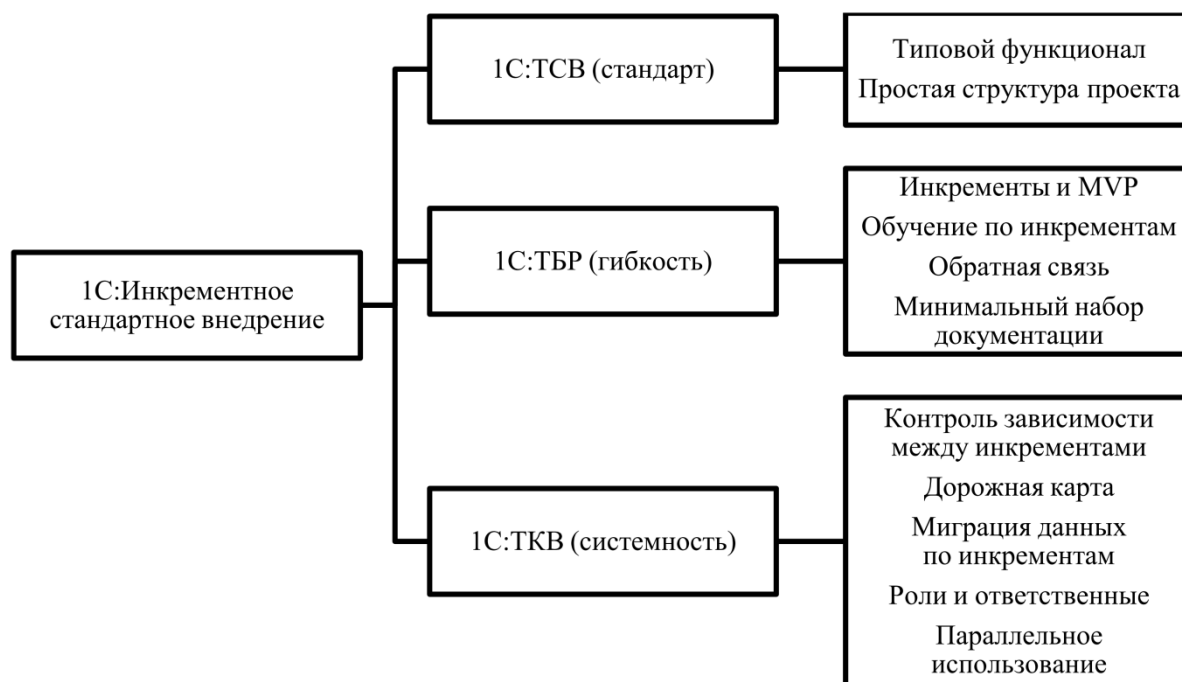
1С:ТБР в полной мере базируется на инкрементном подходе и делает упор на быстрый запуск ключевых блоков и их доработку с учетом обратной связи пользователей. Однако ее слабым местом является сравнительно низкая степень формализации: ответственность распределяется не так строго, а взаимосвязи между инкрементами описываются упрощенно.

1С:ТКВ демонстрирует наибольшую полноту соответствия инкрементной стратегии: от построения MVP и зависимостей между блоками до обучения, миграции данных и обратной связи – все аспекты тщательно регламентированы и формализованы. Но такой уровень проработки оборачивается высокой сложностью и ресурсоемкостью, что оказывается избыточным для малого бизнеса.

#### 4. Формирование гибридной методологии внедрения ERP-системы

##### для малых предприятий на основе 1С-методологии и зарубежных подходов

Для формирования гибридной методологии внедрения 1С – 1С:Инкрементное стандартное внедрение (1С:ИСВ) – мы предлагаем интегрировать лучшие стороны каждого подхода (см. рисунок), чтобы методология могла поддерживать основные требования к инкрементному внедрению в контексте потребностей малых предприятий. Такая методология позволит быстро стартовать, постепенно развиваться и при этом не потерять целостность системы.



**Гибридная стратегия внедрения ERP-системы на малых предприятиях России**  
**Hybrid Strategy for Implementing ERP Systems in Small Enterprises in Russia**

Методологию внедрения можно также улучшить за счет эффективных подходов, разработанных в зарубежных методологиях.

1. Для разработки функционально-логической связи между инкрементами использовать типовые модели бизнес-сценариев по аналогии с SAP Best Practices. В том числе имеет смысл картировать хотя бы основные бизнес-процессы (BPMN) для формализации связей между этапами процессов, данными и пользователями.

2. Организовать более развернутое управление изменениями (Change Management), которое в 1С представлено только обучением пользователей: формализованное управление коммуникацией и организационными последствиями как в методологиях SAP Activate, Microsoft Sure Step, Oracle Unified Method. Определять лидеров изменений (power users) – 1–2 ключевых сотрудника внутри компании, которые становятся «локальными экспертами» для остальных.

3. Определить контрольные точки качества (quality gates) и на каждом этапе внедрения проводить мини-аудит готовности к переходу дальше (Quality Assurance), как в SAP Activate и Oracle Unified Method.

Теперь мы можем собрать дорожную карту методологии 1С:ИСВ – адаптированного подхода для малого бизнеса с учетом лучших зарубежных практик внедрения.

*Шаг 0.* Проводим инициацию проекта.

Из 1С: Определяем цели внедрения и бизнес-результаты, принимаем решение о запуске проекта.

Из западного опыта: Проводим презентацию ERP-решения для сотрудников (первичное управление изменениями).

*Шаг 1.* Проводим мини-обследование и определяем приоритеты

Из 1С: Определяем наиболее критичные функциональные блоки для быстрого старта (MVP).

Из западного опыта: Утверждаем контрольные точки качества (quality gates) для проверки готовности перехода от MVP к следующему этапу.

*Шаг 2.* Запускаем MVP (быстрый старт).

Из 1С: Осуществляем первичную миграцию данных, запускаем MVP с опорой на типовый функционал, проводим синхронное обучение сотрудников на рабочих местах. Организуем поддержку предшествующей системы. Собираем обратную связь, вносим улучшения и изменения.

Из западного опыта: Проверяем контрольные точки качества перед переходом к следующему этапу.

*Шаг 3.* Планируем развитие по инкрементам (инкрементная карта).

Из 1С: Определяем очередность последующих инкрементов, учитывая логические связи между функциональными блоками. Выбираем ответственных за отдельные операции – проверку данных после миграции, синхронизацию с предшествующей системой и т. п. Формируем план миграции данных, сервисов и оборудования в соответствии с инкрементной картой. Определяем регламент работы с предшествующей системой по инкрементам. Формируем перечень пользователей для обучения на каждом инкременте.

Из западного опыта: Используем типовые бизнес-сценарии 1С Best Practices для планирования последовательности инкрементов. Для каждого инкремента определяем основного ответственного (лидера изменений), который отвечает за общий успех инкремента. Разрабатываем план коммуникаций (управление изменениями) для каждого инкремента.

*Шаг 4.* Осуществляем инкрементные циклы.

Из 1С:

4.1. Определяем инкремент согласно инкрементной карте.

4.2. Осуществляем миграцию необходимых данных, сервисов и оборудования из предшествующей системы.

4.3. Проводим синхронное обучение пользователей в соответствии с инкрементом.

4.4. Контролируем параллельную работу предшествующей системы.

4.5. Получаем обратную связь, внедряем улучшения и вносим изменения.

Из западного опыта: Проверяем контрольные точки качества перед переходом к следующему этапу. Организуем мини-сессии с сотрудниками по каждому инкременту в рамках управления изменениями.

*Шаг 5.* Завершаем проект и переводим его в фазу поддержки.

Из 1С: После внедрения планируемых инкрементов отключаем предшествующую систему. Переводим ERP-систему в режим поддержки.

### **Заключение**

Инкрементная стратегия представляет собой перспективный и оправданный подход к внедрению ERP-систем на малых предприятиях, особенно в условиях ограниченных ресурсов, недостаточного опыта и высокой операционной загрузки персонала. Постепенное, управляемое и итеративное внедрение системы не только снижает финансовую и организационную нагрузку, но также способствует наращиванию внутренних ИТ-компетенций, повышает вовлеченность персонала и минимизирует риски, связанные с трансформацией бизнес-процессов.

Анализ зарубежных методологий (SAP Activate, Microsoft Sure Step, Oracle Unified Method) продемонстрировал высокую зрелость и глубину проработки инкрементного подхода, что подтверждает их применимость в условиях внедрения ERP-систем, но требует адаптации для использования в российских реалиях и с учетом особенностей платформы 1С.

Аналогичный анализ российских методологий внедрения (1С:ТСВ, 1С:ТБР, 1С:ТКВ) показал, что наиболее гибкая и приспособленная к инкрементному подходу – это 1С:Технология Быстрого Результата, которая ориентирована на поэтапный запуск ключевых функций. В то же время для получения устойчивого результата такой подход требует обогащения формализованными механизмами планирования, управления изменениями и контроля качества, характерными для лучших зарубежных практик.

Предложенная в работе гибридная методология 1С:Инкрементное Стандартное Внедрение (1С:ИСВ) представляет собой попытку объединить лучшие элементы как российской, так и международной практики, при этом учитывая потребности и возможности малых предприятий. Внедрение 1С:ИСВ позволяет начать проект с минимального жизнеспособного продукта, поэтапно расширять функциональность, системно управлять изменениями и качеством на каждом этапе, а также эффективно вовлекать персонал компании в процесс трансформации.

Таким образом, разработка и применение инкрементной методологии внедрения ERP-систем формирует новые подходы к управлению цифровыми изменениями в секторе малого бизнеса, что делает внедрение ERP-систем более прогнозируемым, контролируемым и адаптированным к реалиям российских предприятий.



### Список литературы

1. Vemula B.R.S. Bridging Legacy and PeopleSoft Applications: A Reference Architecture for Phased PeopleSoft ERP Implementation // International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering (IJCESEN). 2025. Vol. 11, no. 3. P. 6599–6606.
2. Svensson A., Thoss A. Risk Factors When Implementing ERP Systems in Small Companies // Information. 2021. Vol. 12, no. 11. P. 478–489. DOI: 10.3390/info12110478
3. Parr A., Shanks G. A model of ERP project implementation // Journal of Information Technology. 2000. Vol. 15, no. 4. P. 289–303. DOI: 10.1080/02683960010009051
4. Mabert V.A., Soni A., Venkataramanan M.A. Enterprise resource planning: Managing the implementation process // European Journal of Operational Research. 2003. Vol. 146, no. 2. P. 302–314. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00551-9
5. Игошина Д.Р. Особенности цифровизации бизнес-процессов в компаниях малого и среднего предпринимательства // Индустриальная экономика. 2021. № 5-11. С. 1092–1097. DOI: 10.47576/2712-7559\_2021\_5\_11\_1092
6. Назаренко А.А. Распространение цифровых технологий среди малых и средних форм хозяйствующих субъектов в Российской Федерации // Вопросы инновационной экономики. 2021. Т. 11, № 4. С. 1439–1450.
7. Bradley J. Management based critical success factors in the implementation of Enterprise Resource Planning systems // International Journal of Accounting Information systems. 2008. Vol. 9, no. 3. P. 175–200. DOI: 10.1016/j.accinf.2008.04.001
8. Hasheela-Mufeti V., Smolander K. What are the requirements of a successful ERP implementation in SMEs? Special focus on Southern Africa // International Journal of Information Systems and Project Management. 2017. Vol. 5, no. 3. P. 5–20. DOI: 10.12821/ijispm050301
9. An Effective An effective model for evaluating organizational risk and cost in ERP implementation by SME / N.S. Safavi, M. Amini, A. Abdollahzadegan, N.H. Zakaria // IOSR Journal of Business and Management (IOSR-JBM). 2013. Vol. 10, no. 6. P. 70–75. DOI: 10.9790/487X-1066166
10. Tongsuksai S., Mathrani S., Weerasinghe K. Critical success factors and challenges for cloud ERP system implementations in SMEs: A vendors' perspective // 2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE). Brisbane, Australia, 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/CSDE53843.2021.9718428
11. Critical success factors for ERP implementations in Belgian SMEs / C. Doom, K. Milis, S. Poelmans, E. Bloemen // Journal of Enterprise Information Management. 2010. Vol. 23, no. 3. P. 378–406. DOI: 10.1108/17410391011036120
12. Goldston J.A. Qualitative Study of Risk Mitigation in Enterprise Resource Planning Implementations // Global Scientific Journal. 2019. Vol. 7, iss. 12. P. 1129–1159.
13. Курлыкова А.В., Киргизова И.В. Инструментарий оценки управления малым предприятием на основе стратегического подхода // Креативная экономика. 2023. Т. 17, № 1. С. 369–384. DOI: 10.18334/ce.17.1.116925
14. Furumo K. Insuring a Successful ERP Implementation: Lessons Learned from a Failed ERP Project at a State Public University // Case Studies in Digital Government. 2007. P. 110–125. DOI: 10.4018/978-1-59904-177-3.ch008
15. Zach O., Haddara M. ERP Systems in SMEs: A Literature Review // 2011 44th Hawaii International Conference on System Sciences. 2011. P. 1–10. DOI: 10.1109/HICSS.2011.191
16. Malhotra R., Temponi C. Critical decisions for ERP integration: Small business issues // International Journal of Information Management. 2010. Vol. 30 (1). P. 28–37. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2009.03.001
17. Poba-Nzaou P., Raymond L., Fabi B. Adoption and risk of ERP systems in manufacturing SMEs – a positivist case study // Business Process Management Journal. 2008. Vol. 14, no. 4. P. 530–550. DOI: 10.1108/14637150810888064
18. SAP Activate // SAP: сайт. URL: <https://www.sap.com/products/erp/activate-methodology.html> (дата обращения: 05.06.2025).
19. Microsoft Dynamics Sure Step Methodology: A Complete Guide // ERP Software Blog: сайт. 2023. URL: <https://erpsoftwareblog.com/2023/02/microsoft-dynamics-sure-step-methodology/> (дата обращения: 05.06.2025).

20. Oracle Unified Method // Oracle Learning Library: сайт. URL: [https://apexapps.oracle.com/pls/apex/f?p=44785:141:::::P141\\_PAGE\\_ID,P141\\_SECTION\\_ID:10,61](https://apexapps.oracle.com/pls/apex/f?p=44785:141:::::P141_PAGE_ID,P141_SECTION_ID:10,61) (дата обращения: 05.06.2025).

### References

1. Vemula B.R.S. Bridging Legacy and PeopleSoft Applications: A Reference Architecture for Phased PeopleSoft ERP Implementation. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering (IJCESN)*. 2025;11(3):6599–6606.
2. Svensson A., Thoss A. Risk Factors When Implementing ERP Systems in Small Companies. *Information*. 2021;12(11):478–489. DOI: 10.3390/info12110478
3. Parr A., Shanks G. A model of ERP project implementation. *Journal of Information Technology*. 2000;15(4):289–303. DOI: 10.1080/02683960010009051
4. Mabert V.A., Soni A., Venkataramanan M.A. Enterprise resource planning: Managing the implementation process. *European Journal of Operational Research*. 2003;146(2):302–314. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00551-9
5. Igoshina D.R. Features of digitalization of business processes in companies of small and medium entrepreneurship. *Industrial economics*. 2021;5-11:1092–1097. (In Russ.) DOI: 10.47576/2712-7559\_2021\_5\_11\_1092
6. Nazarenko A.A. The spread of digital technologies in small and medium-sized enterprises in the Russian Federation. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2021;11(4):1439–1450. (In Russ.)
7. Bradley J. Management based critical success factors in the implementation of Enterprise Resource Planning systems. *International Journal of Accounting Information Systems*. 2008;9(3):175–200. DOI: 10.1016/j.accinf.2008.04.001
8. Hasheela-Mufeti V., Smolander K. What are the requirements of a successful ERP implementation in SMEs? Special focus on Southern Africa. *International Journal of Information Systems and Project Management*. 2017;5(3): 5–20. DOI: 10.12821/ijispm050301
9. Safavi N.S., Amini M., Abdollahzadegan A., Zakaria N.H. An effective model for evaluating organizational risk and cost in ERP implementation by SME. *IOSR Journal of Business and Management (IOSR-JBM)*. 2013;10(6):70–75. DOI: 10.9790/487X-1066166
10. Tongsuksai S., Mathrani S., Weerasinghe K. Critical success factors and challenges for cloud ERP system implementations in SMEs: A vendors' perspective. In: *2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE)*. Brisbane, Australia, 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/CSDE53843.2021.9718428
11. Doom C., Milis K., Poelmans S., Bloemen E. Critical success factors for ERP implementations in Belgian SMEs. *Journal of Enterprise Information Management*. 2010;23(3):378–406. DOI: 10.1108/17410391011036120
12. Goldston J.A. Qualitative study of risk mitigation in Enterprise Resource Planning implementations. *Global Scientific Journal*. 2019;7(12):1129–1159.
13. Kurlykova A.V., Kirgizova I.V. Small business management evaluation tools based on a strategic approach. *Journal of creative economy*. 2023;17(1):369–384. (In Russ.) DOI: 10.18334/ce.17.1.116925
14. Furumo K. Insuring a successful ERP implementation: Lessons learned from a failed ERP project at a state public university. In: *Case Studies in Digital Government*. 2007. P. 110–125. DOI: 10.4018/978-1-59904-177-3.ch008
15. Zach O., Haddara M. ERP Systems in SMEs: A Literature Review. In: *2011 44th Hawaii International Conference on System Sciences*. 2011. P. 1–10. DOI: 10.1109/HICSS.2011.191
16. Malhotra R., Temponi C. Critical decisions for ERP integration: Small business issues. *International Journal of Information Management*. 2010;30(1):28–37. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2009.03.001
17. Poba-Nzaou P., Raymond L., Fabi B. Adoption and risk of ERP systems in manufacturing SMEs – a positivist case study. *Business Process Management Journal*. 2008;14(4):530–550. DOI: 10.1108/14637150810888064
18. SAP Activate. *SAP: website*. Available at: <https://www.sap.com/products/erp/activate-methodology.html> (accessed 5 Jun. 2025).
19. Microsoft Dynamics Sure Step Methodology: A Complete Guide. *ERP Software Blog: website*. 2023. Available at: <https://erpsoftwareblog.com/2023/02/microsoft-dynamics-sure-step-methodology/> (accessed 5 Jun. 2025).

20. Oracle Unified Method. *Oracle Learning Library: website*. Available at: [https://apexapps.oracle.com/pls/apex/f?p=44785:141:::P141\\_PAGE\\_ID,P141\\_SECTION\\_ID:10,61](https://apexapps.oracle.com/pls/apex/f?p=44785:141:::P141_PAGE_ID,P141_SECTION_ID:10,61) (accessed 5 Jun. 2025).

#### **Информация об авторах**

**Голубева Ольга Леонидовна**, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; golubeva.ol@mail.ru.

**Голлай Александр Владимирович**, д-р техн. наук, доц., директор Высшей школы электроники и компьютерных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gollaiav@susu.ru.

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

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

**Olga L. Golubeva**, Senior Lecturer of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; golubeva.ol@mail.ru.

**Alexander V. Holloy**, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Director of the Higher School of Electronics and Computer Science, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gollaiav@susu.ru.

**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.

**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 27.07.2025**

**The article was submitted 27.07.2025**

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЕКТАМИ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

**Т.А. Аверина**, [ta\\_averina@mail.ru](mailto:ta_averina@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>  
**Г.П. Вершков**, [vershkovgleb1@gmail.com](mailto:vershkovgleb1@gmail.com)

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия*

**Аннотация.** В настоящее время идет активный процесс цифровизации различных сфер и отраслей. Сфера строительства не исключение. Применение технологий BIM-моделирования, цифровых двойников позволяет сократить сроки реализации проектов, снизить количество ошибок, повысить безопасность, в целом оптимизировать управление объектами капитального строительства на всех этапах жизненного цикла. Но сам процесс трансформации, перехода предприятий строительной отрасли на новый уровень четко не прописан и не структурирован. Отсюда более двух третей проектов цифровых преобразований оказываются неудачными. Как правило, предприятия реализуют данный переход методом проб и ошибок, несмотря на имеющийся в настоящее время задел в области проектного управления. **Цель исследования** состоит в выборе наиболее подходящей методологии для управления проектами перехода к цифровому управлению строительными проектами. **Методы.** В работе проведен сравнительный анализ трех наиболее распространенных в настоящее время подходов к управлению проектами: каскадный (Waterfall водопадный), гибкий (Agile), гибридный (Hybrid). Учитывая специфику строительных проектов, были выделены наиболее важные критерии для сравнения методологий: четкость и понятность алгоритмов, документирование, время, адаптивность (гибкость). С помощью метода анализа иерархий определен лучший вариант. **Результаты.** Наиболее предпочтительным является применение именно классического (водопадного) подхода для проектов цифровой трансформации в области управления строительными проектами. **Заключение.** Выбор именно каскадного (водопадного) подхода связан в первую очередь со сложностью процесса цифровизации и необходимостью описания и фиксации дальнейших алгоритмов работы с виртуальными моделями. Далее по мере приобретения необходимого опыта и компетенций организации могут переходить к гибриднему и даже гибкому подходам. Для зрелых облачных организаций гибкий подход становится стандартным режимом работы.

**Ключевые слова:** управление, строительный проект, подходы к управлению проектами, цифровизация, виртуальные модели, метод анализа иерархий

**Для цитирования:** Аверина Т.А., Вершков Г.П. Выбор оптимального подхода к управлению проектами цифровой трансформации в строительной отрасли // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 4. С. 96–106. DOI: 10.14529/ctcr250407

Original article  
DOI: 10.14529/ctcr250407

## SELECTING THE OPTIMAL APPROACH TO MANAGING DIGITAL TRANSFORMATION PROJECTS IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

**T.A. Averina**, [ta\\_averina@mail.ru](mailto:ta_averina@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>  
**G.P. Vershkov**, [vershkovgleb1@gmail.com](mailto:vershkovgleb1@gmail.com)

*Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia*

**Abstract.** Currently, various industries and sectors are actively digitalizing. The construction sector is no exception. The use of BIM modeling and digital twin technologies helps reduce project implementation time and the number of errors, improve safety, and generally optimize the management of capital

construction projects at all stages of the life cycle. However, the process of transformation and transition of construction companies to the next level is not clearly defined and structured. Therefore, more than two-thirds of digital transformation projects fail. Companies typically implement this transition through trial and error, despite the existing foundation in project management. **The research objective** is to select the most appropriate project management methodology for those transitioning to digital management of construction projects. **Methods.** This paper presents a comparative analysis of the three most common project management approaches: Waterfall, Agile, and Hybrid. Given the specifics of construction projects, the most important criteria for comparing methodologies were identified: clarity and comprehensibility of algorithms, documentation, deadlines, and adaptability (flexibility). Using the analytical hierarchy process (AHP) method, the optimal option was identified. **Results.** The classic (waterfall) approach is the most preferable for digital transformation projects in construction project management. **Conclusion.** The choice of a cascade (waterfall) approach is primarily due to the complexity of the digitalization process and the need to describe and document subsequent algorithms for working with virtual models. Subsequently, as organizations accumulate the necessary experience and competencies, they can move to hybrid and even agile approaches. For mature cloud organizations, the agile management model is becoming the standard operating mode.

**Keywords:** management, construction project, project management approaches, digitalization, virtual models, AHP

**For citation:** Averina T.A., Vershkov G.P. Selecting the optimal approach to managing digital transformation projects in the construction industry. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(4):96–106. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250407

## Введение

Строительная отрасль играет ключевую роль в современном мире, обеспечивая развитие инфраструктуры, жилья и экономики в целом [1]. Она создает новые рабочие места, стимулирует инвестиции и улучшает качество жизни населения (табл. 1).

Значение строительной отрасли

Таблица 1

Importance of the construction industry

Table 1

Направление	Содержание
Развитие инфраструктуры	Строительство дорог, мостов, аэропортов, энергетических объектов и других объектов инфраструктуры улучшает мобильность, транспортную доступность и обеспечивает функционирование экономики
Жилищное строительство	Обеспечение населения доступным и качественным жильем является одной из важнейших задач строительной отрасли
Экономическое развитие	Строительство стимулирует инвестиции, создает рабочие места и способствует росту ВВП
Создание комфортной среды	Строительство социальных объектов, таких как школы, больницы, спортивные сооружения и культурные центры, улучшает качество жизни населения
Внедрение инноваций	Современные технологии, такие как BIM, цифровые двойники, робототехника и 3D-печать, повышают эффективность строительных процессов, снижают затраты и улучшают качество строительства
Экологичность	Развитие экологичного строительства и использование «зеленых» материалов становится все более актуальным

Рассматривая современные тенденции в строительной отрасли, следует упомянуть следующие [2] (рис. 1).

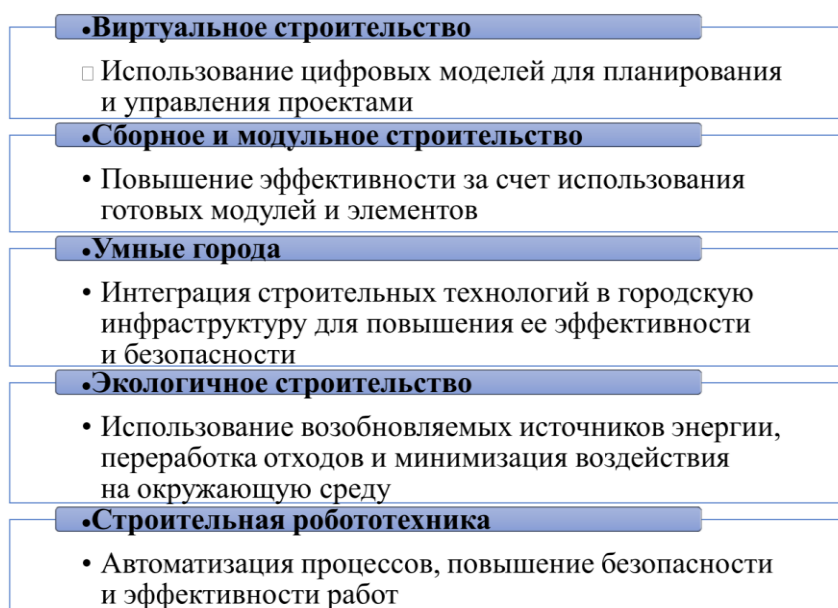


Рис. 1. Современные тенденции в строительной отрасли  
Fig. 1. Current trends in the construction industry

В целом строительная отрасль играет важную роль в развитии современного общества, обеспечивая комфорт, безопасность и экономический рост. Внедрение новых технологий и ориентация на экологичность являются ключевыми факторами дальнейшего развития этой отрасли.

В настоящее время отрасль активно внедряет инновационные технологии, такие как BIM, цифровые двойники и робототехника, что повышает эффективность и безопасность строительства [3–5].

Со слов Н. Парфентьева, директора департамента цифрового развития Минстроя России, «Цифровизация для нас – не самоцель, а инструмент решения двух ключевых задач: сокращения строительного цикла и улучшения качества жизни людей» [6].

При этом внедрение новых технологий в строительной сфере является сложным проектом и требует грамотного управления [7–14].

**Целью исследования** является определение оптимального подхода к управлению проектами при переходе к работе с виртуальными моделями и облачному управлению проектами.

Управление строительными проектами (CPM) – это процесс управления, регулирования и надзора за строительными процессами. CPM позволяет командам планировать проектные работы на этапе подготовки к строительству, отслеживать процесс на этапе реализации, т. е. строительства, оценивать эффективность проекта и его отдельных фаз и закрывать проект после завершения инициативы.

Управление строительными проектами ориентировано на сроки. Эти проекты всегда начинаются с этапа планирования и имеют определенный результат в конце жизненного цикла проекта.

В силу множества требований, которые предъявляются к процессам строительства и его конечным результатам, управление именно строительными проектами является достаточно сложным. Хотя многие элементы жизненного цикла проекта аналогичны общему управлению проектами. Особого внимания требуют ограничения строительного проекта и аспекты безопасности.

Таким образом, следует отметить, что при выстраивании комплексной системы управления строительным проектом необходимо учитывать его особенности. Строительный проект имеет много общего, но и ряд существенных отличий по сравнению с традиционным проектом: большое количество заинтересованных сторон, высокие требования к безопасности, особые потребности.

### Материалы и методы

В работе рассмотрены три наиболее популярных подхода к управлению проектами: каскадный (Waterfall водопадный), гибкий (Agile), гибридный (Hybrid). Для выбора лучшего варианта применяется метод анализа иерархий.

### Сравнение методологий управления проектами

Сегодня используется множество методологий управления проектами [15–17]. Наиболее популярными из них являются каскадная (водопадная), гибкая и гибридная.

Каждый из подходов имеет свои особенности, преимущества и недостатки, рекомендации к применению. Рассмотрим основные аспекты подробнее.

#### Каскадный (классический) подход – Водопад (Waterfall)

Водопадная методология или традиционное управление проектами предписывает следование четко определенным последовательным стадиям (рис. 2).

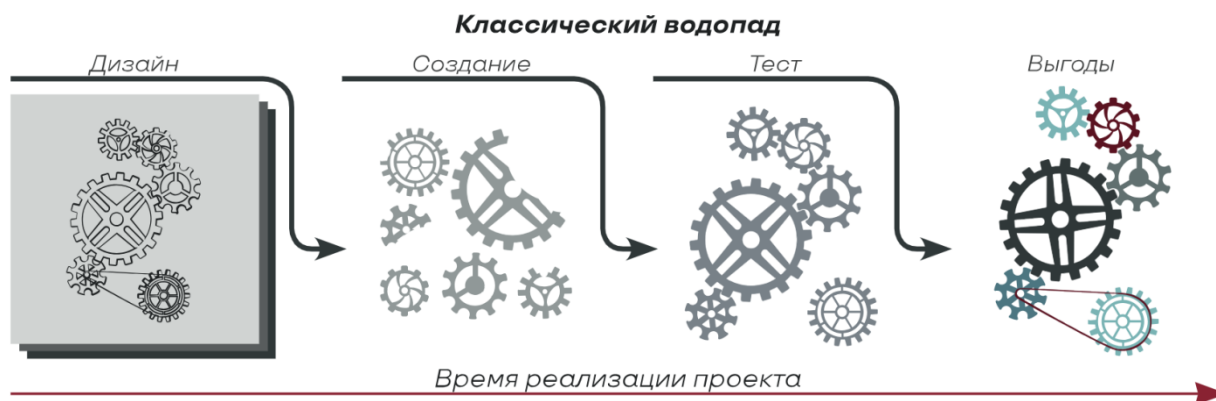


Рис. 2. Водопадная модель управления проектами  
Fig. 2. Waterfall Project Management Model

В зависимости от регламентирующего документа это могут быть фазы выполнения проекта: требования, проектирование, разработка, тестирование и развертывание или, например, стадии управления проектами: инициация, планирование, организация и контроль, анализ и регулирование, закрытие. В любом случае здесь важно отметить, что каждая фаза должна быть завершена до начала следующей. При этом каждый член команды выполняет определенную задачу. Таким образом, главное преимущество методологии каскада заключается в том, что она позволяет менеджерам проектов прогнозировать и отслеживать основные параметры проекта: стоимость, объем и сроки. Самый большой недостаток заключается в том, что конечные пользователи видят результаты только после завершения проекта. Это увеличивает затраты на управление изменениями и устранение неполадок. Например, если бизнес-приоритеты немного изменятся на более позднем этапе цикла, потребуется переработать некоторые артефакты и компоненты, что повлияет на стоимость, объем работ и сроки.

#### Гибкий подход – Agile

Методология Agile-проектов появилась в начале 2000-х годов как ответ на жесткую структуру традиционных методов управления проектами каскадной модели. Фундаментальное отличие от последовательной методологии каскадной модели состоит в том, что методология Agile фокусируется на итеративной поставке продукта и постоянной обратной связи от пользователей (рис. 3). Члены команды тесно сотрудничают, разрушая разрозненность между различными функциями. Методология Agile использует набор практик, которые объединяют разработку и ИТ-операции, называемые DevOps.

Основное преимущество Agile – гибкость, поскольку она позволяет командам быстро внедрять функции, которые наиболее важны для бизнеса. Вместо того чтобы выпускать весь продукт сразу, методология Agile разбивает процесс поставки на более мелкие итерации. Каждая итерация обычно длится от одной до четырех недель.

Основным недостатком гибкой методологии является сложность прогнозирования конечных сроков и бюджетов. Постоянная обратная связь от пользователей может расширить область действия, что негативно скажется на сроках и бюджетах.



Рис. 3. Гибкая модель управления проектами  
Fig. 3. Flexible project management model

### Гибридный подход – Hybrid

Гибридная методология управления проектами объединяет лучшие практики каскадной и гибкой методологий. Согласно исследованию PMI «Будущее работы: прокладывая путь с помощью PMTQ», 60 % компаний используют гибридный подход к управлению проектами. При гибридной методологии руководители проектов документируют требования и создают полную конструкцию системы заранее, поскольку они обеспечивают бюджет и ресурсы на весь срок проекта. После определения общей концепции команды используют гибкую структуру для итеративной поставки конечным пользователям и учета их пожеланий в дальнейшей работе. Таким образом, при необходимости уже в следующей итерации, необходимые изменения могут быть внесены, не дожидаясь окончания фазы внедрения. Гибридный подход позволяет компаниям извлечь выгоду из гибкого управления проектами, одновременно снижая связанные с ним риски. Главное в данном случае найти оптимальный баланс сочетания водопадного и гибкого подходов (табл. 2).

#### Сравнение подходов

#### Comparison of approaches

Таблица 2

Table 2

Параметры	Waterfall	Agile	Hybrid
Простота понимания	+++	++	+
Прогнозируемость	+++	+	++
Обеспечение качества на каждом этапе	+++	++	+
Документирование	+++	+	++
Время	+	+	++
Вовлеченность клиентов	+	++	+++
Гибкость	+	+++	++
Дополнительное ПО и обучение	+	+++	++

Обобщим выявленные преимущества и недостатки вышеуказанных подходов в позиции проявления или оптимизации нижеуказанных параметров в табл. 3.

#### Оценка подходов к управлению по выбранным критериям

#### Evaluation of management approaches according to selected criteria

Таблица 3

Table 3

Параметры	Waterfall	Agile	Hybrid
Четкость и понятность алгоритмов	Высокая	Средняя	Низкая
Документирование	Высокая	Средняя	Средняя
Время	Низкая	Средняя	Высокая
Адаптивность (гибкость)	Низкая	Высокая	Выше среднего



Применение современных цифровых технологий позволяет в значительной степени оптимизировать процессы управления проектами. Но по данным Harvard Business Review, более 70 % цифровых преобразований терпят неудачу. А по данным Forbes, 84 % компаний не успешны в процессах цифровой трансформации [5].

Одной из причин является отсутствие надлежащего управления, что приводит к плохой кросс-функциональной согласованности. Чтобы избежать этой распространенной ошибки, организации должны выбрать методологию управления проектами для разработки стратегий до начала преобразований.

### Выбор лучшего подхода к управлению проектами цифровой трансформации в строительной отрасли

Для выбора оптимального подхода к управлению проектами цифровой трансформации будем использовать метод анализа иерархий (МАИ). Метод реализуется по следующему алгоритму (рис. 4).



Рис. 4. Алгоритм реализации метода анализа иерархий  
Fig. 4. Algorithm for implementing the hierarchy analysis method

Рассмотрим 3 альтернативы, которые обозначим  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , где  $A_1$  – традиционный подход к управлению проектами (Waterfall – водопадный),  $A_2$  – гибкий подход (Agile),  $A_3$  – гибридный подход (Hybrid); и четыре критерия выбора альтернатив  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ , где  $K_1$  – четкость и понятность алгоритмов,  $K_2$  – документирование,  $K_3$  – время,  $K_4$  – адаптивность.

Дерево альтернатив представлено на рис. 5.

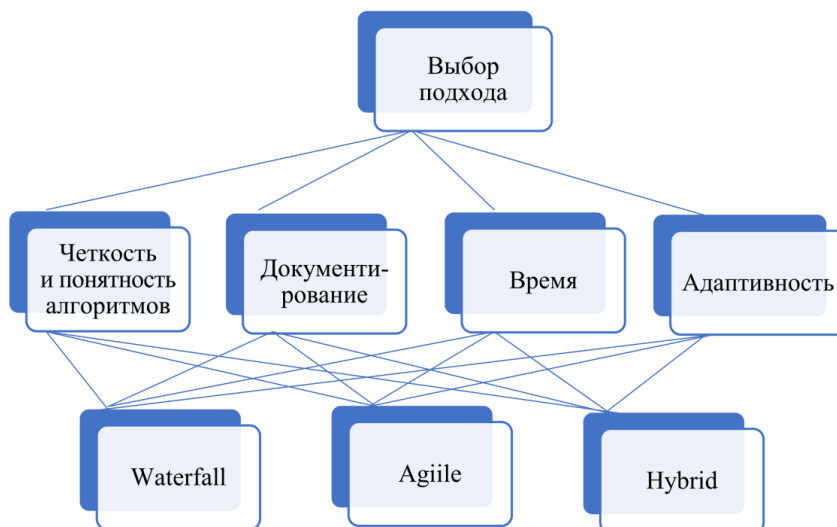


Рис. 5. Дерево альтернатив  
Fig. 5. Tree of alternatives

При построении матрицы альтернатив, оценке критериев будем придерживаться следующей шкалы (рис. 6). Исходно попарное сравнение по качественной шкале с последующим преобразованием в баллы.

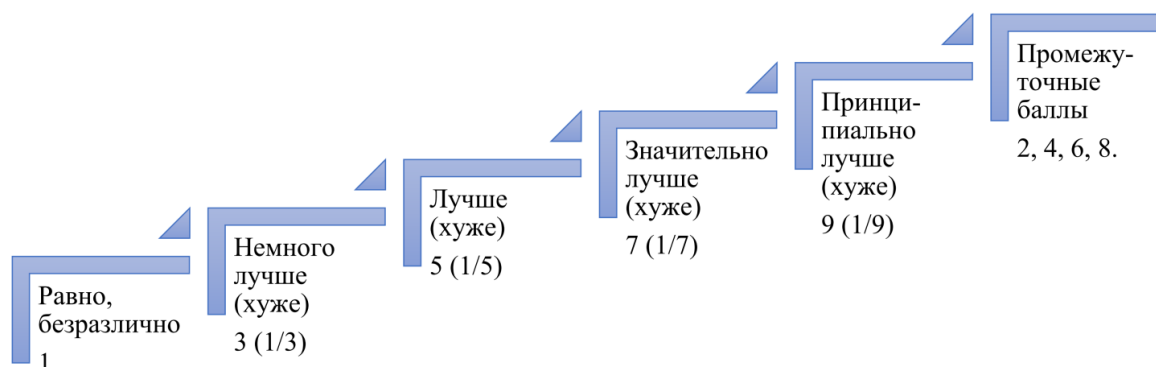


Рис. 6. Шкала для сравнения альтернатив  
Fig. 6. Scale for comparing alternatives

Сравниваем четыре альтернативы друг с другом по критерию  $K_1$ . В результате попарного сравнения получаем матрицу сравнений  $V_{ij}^{(1)}$ , каждый элемент которой в том случае, если альтернатива  $A_i$  не менее предпочтительна, чем альтернатива  $A_j$ , равен  $h$ , где  $h$  является степенью предпочтительности. Соответственно, если альтернатива  $A_i$  не является более предпочтительной, чем альтернатива  $A_j$ , то соответствующий элемент матрицы сравнения  $V_{ij}^{(1)}$  равен  $1/h$ .

Таким же образом вычисляются матрицы сравнения  $V_{ij}^{(k)}$  для других критериев, где  $k = 1, 2, 3, 4$ . Матрицы попарных сравнений альтернатив  $V_{ij}^{(1)}, V_{ij}^{(2)}, V_{ij}^{(3)}, V_{ij}^{(4)}$  представлены в табл. 4–7).

Таблица 4  
Критерий «Четкость  
и понятность алгоритмов»

Table 4  
Criterion "Clarity  
and understandability of algorithms"

	Waterfall	Agile	Hybrid
Waterfall	1	9	7
Agile	1/9	1	1/3
Hybrid	1/7	3	1

Таблица 5  
Критерий  
«Документирование»

Table 5  
Criterion  
"Documentation"

	Waterfall	Agile	Hybrid
Waterfall	1	9	7
Agile	1/9	1	1/5
Hybrid	1/7	5	1

Таблица 6  
Критерий «Время»

Table 6  
Criterion "Time"

	Waterfall	Agile	Hybrid
Waterfall	1	1/5	1/3
Agile	5	1	3
Hybrid	3	1/3	1

Таблица 7  
Критерий «Адаптивность»

Table 7  
Criterion "Adaptability"

	Waterfall	Agile	Hybrid
Waterfall	1	1/7	1/5
Agile	7	1	3
Hybrid	5	1/3	1

Далее проводим нормировку: находим сумму элементов каждого столбца и делим все элементы матрицы на сумму элементов соответствующего столбца.

Далее вычисляем собственные векторы альтернатив по каждому из критериев. Для каждой  $i$ -й альтернативы по  $k$ -му критерию находим элемент вектора  $U_i^{(k)}$ , который равен среднегеометрическому показателю матрицы сравнения для данной альтернативы:

$$U_i^{(k)} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n V_{ij}^{(k)}} = \sqrt[n]{V_{i1}^{(k)} \times V_{i2}^{(k)} \times \dots \times V_{in}^{(k)}}. \quad (1)$$

Аналогично вычисляем собственный вектор для матрицы сравнения критериев. Далее в результате нормализации собственных векторов вычисляем веса альтернатив по каждому критерию, а также веса самих критериев. Результаты вычислений представлены в табл. 8, 9.

Вес  $i$ -й альтернативы по  $k$ -му критерию  $W_i^{(k)}$  рассчитывается как отношение соответствующего элемента собственного вектора  $U_i^{(k)}$  к сумме всех элементов собственного вектора данного критерия:

$$W_i^{(k)} = \frac{U_i^{(k)}}{\sum_{i=1}^n U_i^{(k)}} = \frac{U_i^{(k)}}{U_1^{(k)} + U_2^{(k)} + \dots + U_n^{(k)}}. \quad (2)$$

Интегральная таблица критериев и весов

Таблица 8

Table 8

Integrated table of criteria and weights

	Четкость и понятность алгоритмов	Документирование	Время	Адаптивность
Waterfall	0,78539	0,77202	0,10473	0,07193
Agile	0,06579	0,05455	0,63699	0,64911
Hybrid	0,14882	0,17343	0,25828	0,278956

Таблица 9

Веса критериев

Table 9

Criteria weights

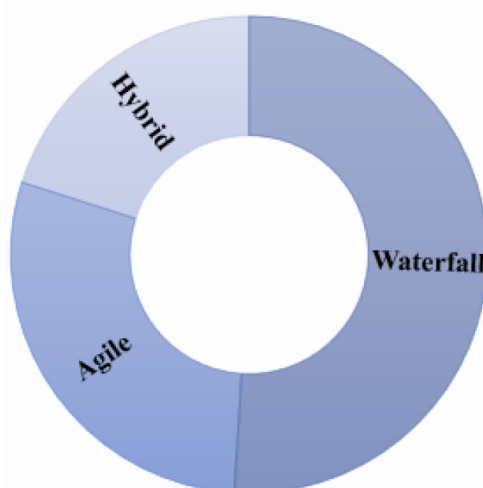
Четкость и понятность алгоритмов	0,44091
Документирование	0,17023
Время	0,12935
Адаптивность	0,25951

Далее рассчитываем функцию полезности  $i$ -й альтернативы по следующей формуле:

$$F_i = \sum_{k=1}^m W_i^{(k)} \times W_{\text{крит}}^{(k)} = W_i^{(1)} \times W_{\text{крит}}^{(1)} + W_i^{(2)} \times W_{\text{крит}}^{(2)} + \dots + W_i^{(m)} \times W_{\text{крит}}^{(m)}. \quad (3)$$

Полученные значения полезности альтернатив представлены на рис. 7.

### ОПТИМАЛЬНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ



Waterfall	0,50992
Agile	0,28914
Hybrid	0,20094

Рис. 7. Результаты МАИ

Fig. 7. AHP results

### Заключение

Таким образом, в большей степени с поставленной задачей справится традиционный подход к управлению проектами. В первую очередь это связано со сложностью процесса цифровизации и необходимостью описания и фиксации дальнейших алгоритмов работы с виртуальными моделями.

Данные выводы подтверждаются и практикой. Традиционный способ выполнения проектов, в том числе и проектов в ИТ-сфере, по-прежнему широко распространен в государственных организациях и других достаточно строго регулируемых отраслях. Независимо от отрасли перенос монолитной системы в облако является типичным сценарием для каскадной методологии. Из-за сложных зависимостей, которые должны быть реализованы до полной миграции, рекомендуется последовательный подход. Для многих организаций поэтапная миграция является первым шагом на пути к цифровым инновациям, за которым следуют инициативы по модернизации, которые уже могут реализовываться гибко.

По мере продвижения организаций по облачному пути они переводят свои методы управления проектами на гибкие. Для зрелых облачных организаций гибкий подход становится стандартным режимом работы.

Такая трансформация не происходит в одночасье. Она требует обучения, поддержки и наставничества групп разработки, проектирования и эксплуатации облака в гибких методах. Лучший способ принять новый метод работы – это практический опыт. Акселерация, основанная на опыте (ЕВА), является одним из механизмов, позволяющих командам повысить эффективность бизнеса при внедрении гибких моделей работы. Процесс ЕВА объединяет кросс-функциональные команды и разрушает традиционные барьеры.

В конечном итоге выбор между каскадным, гибким и гибридным управлением проектами для проектов миграции и трансформации в цифровую среду будет зависеть от их зрелости в облаке, ресурсов и организационных целей.

### Список литературы

1. Управление строительным комплексом / Т.А. Аверина, С.А. Баркалов, Е.В. Баутина и др.; под общ. ред. С.А. Баркалова. М.: Изд-во ООО «Ритм», 2024. 456 с.
2. Construction Industry Trends to Watch (2024–2027). [Электронный ресурс]. URL: <https://explodingtopics.com/blog/construction-industry-trends> (дата обращения: 17.05.2025).
3. Аверина Т.А. Виртуальные модели в управлении жизненным циклом объекта капитального строительства // Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2024. С. 42–48. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.006
4. Аверина Т.А. О применении цифровых двойников в управлении различными функциональными областями строительных проектов // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сб. науч. тр. М., 2024. С. 3291–3294.
5. Семь рычагов цифровой трансформации [Электронный ресурс]. URL: <https://dialog.guide/siem-rychagov-tsifrovoi-transformatsii/> (дата обращения: 18.06.2025).
6. Цифровая трансформация строительства: новые подходы и технологии [Электронный ресурс]. URL: <https://digital-build.ru/czifrovaya-transformacziya-stroitelstva-novye-podhody-i-tehnologii/> (дата обращения: 12.07.2025).
7. Управление проектами и программами (углубленный курс) / Т.А. Аверина, С.А. Баркалов, Е.В. Баутина и др.; под общ. ред. С.А. Баркалова. Воронеж: АО «Воронежская областная типография», 2023. 460 с.
8. Управление проектами: Основы профессиональных знаний, Национальные требования к компетентности специалистов (NCB – SOVNET National Competence Baseline Version 3.0) М.: ЗАО «Проектная ПРАКТИКА», 2010. 256 с.
9. Математические методы и модели управления проектами: учеб. пособие / И.В. Буркова, Я.Д. Гельруд, О.В. Логиновский, А.Л. Шестаков. Челябинск: Издат. центр ЮрГУ, 2018. 193 с.
10. Математические основы управления проектами: учеб. пособие / С.А. Баркалов, В.И. Воропаев, Г.И. Секлетова и др.; под ред. В.Н. Буркова. М.: Высшая школа, 2005. 423 с.
11. Полковников А.В., Дубовик М.Ф. Управление проектами. Курс МВА. М.: Олимп-Бизнес, 2021. 552 с.

12. Товб А.С., Ципес Г.Л. Управление проектами: стандарты, методы, опыт. 2-е изд., стер. М.: Олимп-Бизнес, 2005. 240 с.
13. Умное управление проектами: учеб. пособие / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, Я.Д. Гельруд и др.: под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2019. 189 с.
14. Управление проектами = Project Management: справ. для профессионалов / [А.В. Цветков и др.]. М.: Омега-Л, 2010. 1276 с.
15. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBOK). Шестое издание. М.: Олимп-Бизнес, 2017. 762 с.
16. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBOK). Седьмое издание. PMI, 2021 372 с.
17. Гибкие и каскадные подходы к управлению проектами [Электронный ресурс]. URL: [https://gosagile.cdto.ranepa.ru/1\\_3](https://gosagile.cdto.ranepa.ru/1_3) (дата обращения: 18.06.2025).

### References

1. Averina T.A., Barkalov S.A., Bautina E.V., Karpovich M.A., Mailyan L.D., Serebryakova E.A., Shevchenko L.V. *Upravlenie stroitel'nykh kompleksom* [Construction complex management]. Moscow: LLC "Ritm" Publ., 2024. 456 p. (In Russ.)
2. Construction Industry Trends to Watch (2024–2027). Available at: <https://explodingtopics.com/blog/construction-industry-trends> (accessed 17.05.2025).
3. Averina T.A. Virtual models in life cycle management of construction project. In: *Informatsionnoe modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury: materialy VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Information modeling in construction and architecture problems: Proceedings of the VII International scientific and practical conference]. St. Petersburg; 2024. P. 42–48. (In Russ.) DOI: 10.23968/BIMAC.2024.006
4. Averina T.A. [On the use of digital twins in the management of various functional areas of construction projects]. In: *XIV Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya: sbornik nauchnykh trudov* [XIV All-Russian conference on management problems. Collection of scientific papers]. Moscow, 2024. P. 3291–3294. (In Russ.)
5. *Sem' rychagov tsifrovoy transformatsii* [Seven levers of digital transformation]. (In Russ.) Available at: <https://dialog.guide/siem-rychagov-tsifrovoy-transformatsii/> (accessed 18.06.2025).
6. *Tsifrovaya transformatsiya stroitel'stva: novye podkhody i tekhnologii* [Digital Transformation of Construction: New Approaches and Technologies]. (In Russ.) Available at: <https://digital-build.ru/czifrovaya-transformatsiya-stroitelstva-novye-podhody-i-tehnologii/> (accessed 12.07.2025).
7. Averina T.A., Barkalov S.A., Bautina E.V., Karpovich M.A., Serebryakova E.A., Shevchenko L.V. *Upravlenie projektami i programmami (uglublennyy kurs)* [Project and program management (advanced course)]. Voronezh: JSC "Voronezh Regional Printing House", 2023. 460 p. (In Russ.)
8. *Upravlenie projektami: Osnovy professional'nykh znaniy, Natsional'nye trebovaniya k kompetentnosti spetsialistov* [Project Management: Fundamentals of Professional Knowledge, National Requirements for the Competence of Specialists] (NCB – SOVNET National Competence Baseline Version 3.0). Moscow: JSC "Proektnaya PRAKTIKA", 2010. 256 p. (In Russ.)
9. Burkova I.V., Gel'rud Ya.D., Loginovskiy O.V., Shestakov A.L. *Matematicheskie metody i modeli upravleniya projektami: uchebnoe posobie* [Mathematical Methods and Models of Project Management: A Tutorial]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ., 2018. 193 p. (In Russ.)
10. Barkalov S.A., Voropaev V.I., Sekletova G.I. et al. *Matematicheskie osnovy upravleniya projektami: ucheb. posobie* [Mathematical Foundations of Project Management: A Tutorial]. Moscow: Vysshaya shkola, 2005. 423 p. (In Russ.)
11. Polkovnikov A.V., Dubovik M.F. *Upravlenie projektami. Kurs MBA* [Project management. MBA course]. Moscow: Olimp-Biznes, 2021. 552 p. (In Russ.)
12. Tovb A.S., Tsipes G.L. *Upravlenie projektami: standarty, metody, opyt* [Project management: standards, methods, experience]. 2nd ed., reprinted. Moscow: Olimp-Biznes, 2005. 240 p. (In Russ.)
13. Barkalov S.A., Burkov V.N., Gelrud Ya.D. et al. *Umnoe upravlenie projektami: ucheb. posobie* [Smart project management: a tutorial]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ., 2019. 189 p. (In Russ.)
14. Tsvetkov A.V. et al. *Upravlenie projektami = Project Management: spravochnik dlya professionalov* [Project Management: a guide for professionals]. Moscow: Omega-L, 2010. 1276 p. (In Russ.)

15. *Rukovodstvo k Svodu znaniy po upravleniyu proektami (Rukovodstvo PMBOK)* [A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)]. Sixth edition. Moscow: Olimp-Biznes, 2017. 762 p. (In Russ.)

16. *Rukovodstvo k Svodu znaniy po upravleniyu proektami (Rukovodstvo PMBOK)* [A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)]. Seventh edition. PMI, 2021 372 p. (In Russ.)

17. *Gibkie i kaskadnye podkhody k upravleniyu proektami* [Flexible and cascade approaches to project management]. (In Russ.) Available at: [https://gosagile.cdto.ranepa.ru/1\\_3](https://gosagile.cdto.ranepa.ru/1_3) (accessed 18.06.2025).

#### ***Информация об авторах***

**Аверина Татьяна Александровна**, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; [ta\\_averina@mail.ru](mailto:ta_averina@mail.ru).

**Вершков Глеб Павлович**, магистрант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; [vershkovgleb1@gmail.com](mailto:vershkovgleb1@gmail.com).

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

**Tatiana A. Averina**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; [ta\\_averina@mail.ru](mailto:ta_averina@mail.ru).

**Gleb P. Vershkov**, Master's student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; [vershkovgleb1@gmail.com](mailto:vershkovgleb1@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 30.07.2025**

**The article was submitted 30.07.2025**

## ПОИСК ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПРОЦЕССНЫХ РАЗРЫВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФОВ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В ХОЛАКРАТИЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

**Я.Е. Кротов**<sup>1</sup>, [yakov.krotoff@gmail.com](mailto:yakov.krotoff@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-5294-2396>

**В.Г. Разумов**<sup>2</sup>, [wisewolf7778@gmail.com](mailto:wisewolf7778@gmail.com)

<sup>1</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

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

**Аннотация.** Статья посвящена проблеме поиска функционально-процессных разрывов в холакратической организационной системе. **Цель исследования.** Графовые нейронные сети являются прикладным инструментом для работы с большим массивом неструктурированных данных, в том числе представляющих описание организационных систем, позволяя упорядочивать связи бизнес-процессов и выполняемых функций в виде графов. В свою очередь, образуемые между графами связи позволяют решать задачу поиска функциональных разрывов и аномалий в организационных системах любого типа, в том числе холакратических. **Материалы и методы.** В работе предложен подход к поиску функциональных разрывов по процессам с учетом разветвленной структуры управления в большой организационной системе. Подход базируется на данных, полученных в виде машиночитаемого текста из положений о подразделениях, приказов о распределении полномочий и должностных инструкций холакратической организации. Метод реализуется через построение дерева функций и выявление функционально-процессных разрывов, в том числе по пересекающимся ветвям. **Результаты.** Результатом исследования является математическая модель на базе графовых эмбедингов, представленная в форме векторизации текста. Графовая нейронная сеть, разработанная на базе математической модели, позволяет перейти к управлению холакратической организационной системой через сравнение функций по нормативно-распорядительной документации для решения задачи по определению функционально-процессных разрывов. Моделирование функций холакратической организации представляется в виде дерева, а полученные при помощи графовой нейронной сети вычислительные значения позволяют идентифицировать функционально-процессные разрывы. **Заключение.** Полученные результаты позволяют инициировать циклы изменения функций в холакратической организационной системе с целью последующей оптимизации стоимости исполнения процессов. В качестве базовой рекомендации предлагается применение разработанной графовой нейронной сети в холакратических организационных системах для поиска функционально-процессных разрывов с целью последующей оптимизации как модели управления, так и отдельно взятых процессов.

**Ключевые слова:** управление в организационных системах, холакратические организации, математические модели, графовые эмбединги, графовые нейронные сети, поиск функционально-процессных разрывов

**Для цитирования:** Кротов Я.Е., Разумов В.Г. Поиск функционально-процессных разрывов с использованием графов нейронной сети в холакратической организационной системе // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 4. С. 107–121. DOI: 10.14529/ctcr250408

Original article  
DOI: 10.14529/ctcr250408

## SEARCH FOR FUNCTIONAL-PROCESS GAPS USING A GRAPH NEURAL NETWORK IN A HOLACRATIC ORGANIZATIONAL SYSTEM

Ya.E. Krotov<sup>1</sup>, [yakov.krotoff@gmail.com](mailto:yakov.krotoff@gmail.com)  
V.G. Razumov<sup>2</sup>, [wisewolf7778@gmail.com](mailto:wisewolf7778@gmail.com)

<sup>1</sup> ITMO University, St. Petersburg, Russia

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

**Abstract.** The article is devoted to the problem of searching for functional-processual gaps in a holacratic organizational system. **The purpose of the study.** Graph neural networks are an applied tool for working with a large array of unstructured data, including those representing a description of organizational systems, allowing you to organize the connections of business processes and functions performed in the form of graphs. In turn, the connections formed between graphs allow you to solve the problem of finding functional gaps and anomalies in organizational systems of any type, including holacratic ones. **Materials and methods.** The paper proposes an approach to finding functional gaps in processes taking into account the branched management structure in a large organizational system. The approach bases on data obtained in the form of machine-readable text from regulations on departments, orders on the distribution of powers and job descriptions of a holacratic organization. The method is implemented through the construction of a tree of functions and the identification of functional-process gaps, including those along intersecting branches. **Results.** The result of the study is a mathematical model based on graph embeddings, presented in the form of text vectorization. The graph neural network developed on the basis of the mathematical model allows one to move on to managing a holacratic organizational system through a comparison of functions according to regulatory and administrative documentation to solve the problem of identifying functional and process gaps. Modeling of the functions of a holacratic organization is presented in the form of a tree, and the computational values obtained using the graph neural network allow one to identify functional and process gaps. **Conclusion.** The obtained results allow to initiate cycles of changing functions in a holacratic organizational system for the purpose of subsequent optimization of the cost of process execution. As a basic recommendation, it is proposed to use the developed graph neural network in holacratic organizational systems to search for functional-process gaps for the purpose of subsequent optimization of both the management model and individual processes.

**Keywords:** management in organizational systems, holacratic organizations, mathematical models, graph embeddings, graph neural networks, search for functional-process gaps

**For citation:** Krotov Ya.E., Razumov V.G. Search for functional-process gaps using a graph neural network in a holacratic organizational system. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(4):107–121. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250408

### Введение

Современные организационные системы характеризуются большим набором плохо структурированных данных, которые генерируются при взаимодействии человека с человеком, человека с информационными системами и человека с агентами нейронных сетей. Кроме того, в качестве первичного источника данных могут выступать специализированные хранилища, базы данных информационных систем, цифровые копии нормативно-распорядительной документации, а также архивные документы, проходящие процедуру оцифровки. Упомянутые источники данных позволяют сформировать первичное представление о том, чем занимается организация, какие процессы ей присущи и каким образом она управляется, но не дает целостной картины об организации как системе. Отметим, что скорость обработки всех источников данных силами естественного интеллекта не позволяет оперативно определять, какой из процессов или управляющих функций организационной системы необходимо обновить или оптимизировать, исходя из тех функционально-процессных разрывов, которые есть в организации на момент обработки данных.

Для формирования актуальной функциональной структуры системы по её организационной семантике и дальнейшего поиска функционально-процессных разрывов может быть использована



математическая модель на базе теории графов. В частности, предлагается при помощи математических преобразований перевести машиночитаемый текст в набор векторов и выстроить процесс генерации знаний об организационной системе через набор графовых эмбедингов. При таком подходе модель будет формироваться из математических структур, состоящих из векторов, образуя векторные пространства. В модели эмбедингов для каждого отдельно взятого семантического случая каждый вектор будет представлять собой уникальный образ объекта организационной системы. Тогда векторная размерность будет определять количество координат, используемых для описания всех компонентов векторного пространства.

Зная расстояние между векторами в эмбедингах, можно оценить положение объектов организационной системы в векторном пространстве, создавая основу для формирования дополнительного знания об организации и её функциях. Для векторизации текста используем такие математические понятия, как Евклидово расстояние и Манхэттенское расстояние. Евклидово расстояние в эмбедингах будет вычисляться как квадратный корень из суммы квадратов разностей соответствующих компонентов нескольких векторов:

$$d(a, b) = \sqrt{\sum_i (a_i - b_i)^2}.$$

Отметим, что такое расстояние лучше всего подходит для работы с абсолютными различиями векторов. Манхэттенское расстояние в эмбедингах будет вычисляться как сумма абсолютных разностей компонентов векторов заданного пространства:

$$d(a, b) = \sum_i |a_i - b_i|.$$

Тогда объектом сравнения будет выступать степень сходства между векторами. Этот способ наиболее релевантен для поиска степени сходства по контексту или семантике между двумя объектами векторного пространства. Также следует упомянуть применимость косинусного сходства, когда сходство векторов определяется через синус угла между ними. При небольшом угле между векторами косинус будет стремиться к единице, а значит, будет иметь место высокое сходство между сравниваемыми векторами:

$$\text{similarity}(a, b) = \frac{a \cdot b}{|a| \cdot |b|},$$

где числительное множество означает скалярное произведение векторов, а знаменательное множество по модулю – их нормы.

Таким образом, целевая модель формируется от низких размерностей до многомерных эмбедингов, представляя узлы графов в виде векторов. Накапливая массив данных об объектах векторных пространств отдельно взятых функциональных направлений организационной системы в виде графовых связей, можно перейти к анализу графовых структур (рис. 1). Анализ связей осуществляется путем извлечения сущностей и их взаимосвязей из изначальных нормативно-распорядительных документов. В результате формируется граф знаний об отдельно взятой функции или процессе, который связан через вершины и ребра. Такой подход дает возможность перейти в парадигму поиска функционально-процессных разрывов при помощи графовой нейронной сети.

Физический смысл сводится к созданию множества  $M$  независимых ребер графа  $G = (V, E)$ . В таком случае каждая вершина из множества  $U \subseteq V$  инцидентна некоему ребру паросочетания  $M$ , следовательно,  $M$  покрывает множество  $U$ . Тогда вершины из  $U$  будут называться покрытыми, а все оставшиеся – непокрытыми. Проблемы вычислений в таких графах хорошо описывают специфику сложных процессов, например, холакратическую организационную систему с большим количеством взаимосвязанных функций. Сформируем задачи исследования.

**Постановка задач исследования.** Необходимо доказать, что устранение функционально-процессных разрывов с использованием графовой нейронной сети в холакратической организационной системе является эффективным средством управления таким типом организации.

Первая задача исследования – апробировать математическую модель на базе теории графов для холакратической организационной системы.

Вторая задача исследования – в короткий промежуток времени понять, чем занимается холакратическая организация через установление структуры по имеющимся нормативно-распорядительным документам и вспомогательным наборам данных путем проведения эксперимента. При решении задачи важно учесть возможность построения дерева функций холакратической организации по всему массиву доступных данных, а также учесть дублирование функций.

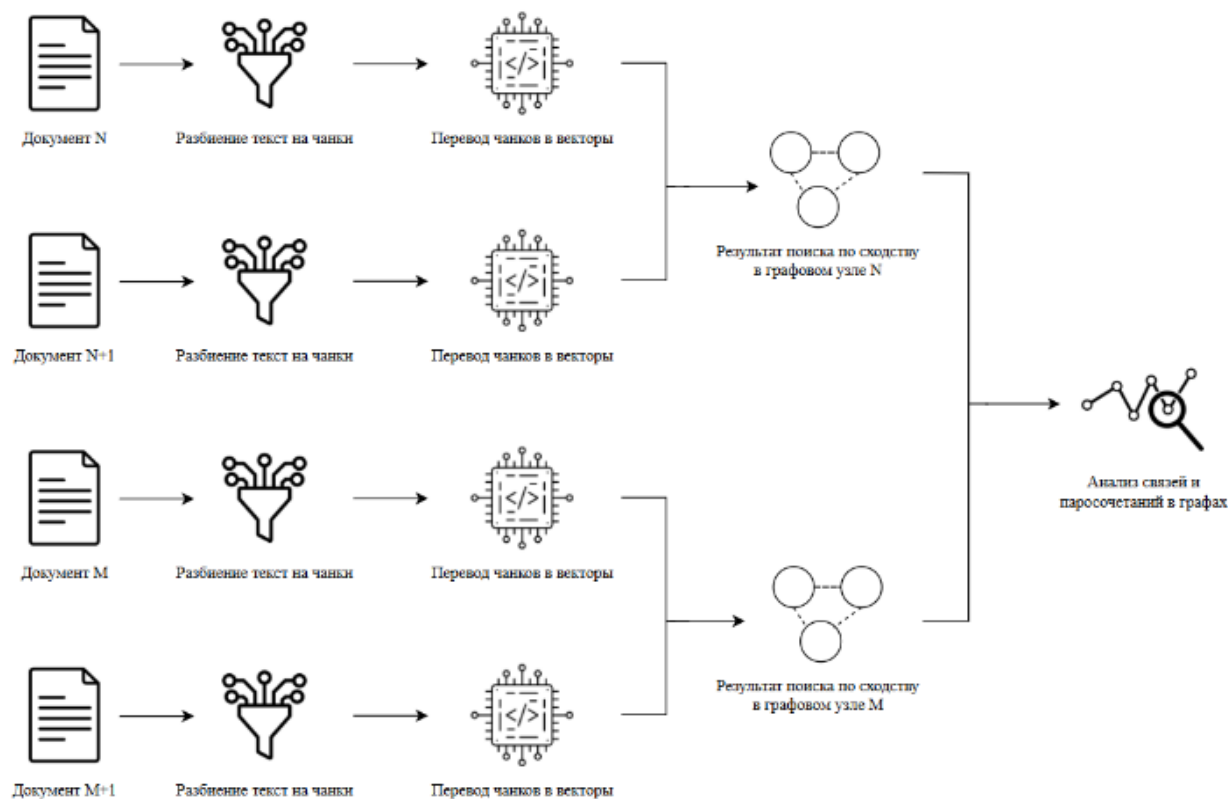


Рис. 1. Переход анализа эмбедингов в модель анализа графовых связей и паросочетаний  
Fig. 1. Embedding analysis transfer into graph relations and matchings analysis model

Третья задача исследования – установить эффективность работы холакратической организационной системы управления и её функций от верхнего уровня до отдельно взятых сотрудников на основе найденных функционально-процессных разрывов.

Необходимость решения поставленных задач обусловлена научной новизной исследования, которая заключается в том, что применение графовых нейронных сетей для холакратических организаций ранее не было представлено в теории и практике управления организационными системами.

#### Анализ предметной области

Рассмотрим анализ предметной области в части применения графовых нейронных сетей для классических организационных систем – каскадных, матричных и гибридных. Отметим, что ранее графовые нейронные сети не использовались для поиска функционально-процессных разрывов в холакратических организационных системах, соответственно необходимо выявить известные проблемы для других типов организационных систем, а также описать известные способы их решений. Таким образом, объектом настоящего исследования станут процессы холакратической организационной системы, а предметом – её модель управления.

Установим понятийный аппарат. Под графовой нейронной сетью понимаем такой тип нейронной сети, которая предназначена для работы с большим массивом неструктурированных данных, упорядоченных в виде графов [21, с. 46]. Важно учесть ограничения и допущения, о которых писал И. Рудко [12, с. 2342]. Ограничением проектирования графовой нейронной сети для каскадной организационной системы становится унификация данных с целью установления структуры бизнес-процессов с последующей привязкой к модели управления. Проблемной точкой предметной области исследования является отсутствие достоверных источников для анализа функций на уровне всей организации, а также отсутствие вспомогательного инструментария для работы с прогнозированием вариаций в конкретный момент времени.

Одним из актуальных вопросов проектирования графовой нейронной сети становится унификация данных с целью последующего установления структуры бизнес-процессов по дереву функций с привязкой к модели организационной системы. При таком подходе графовые связи

позволяют решать задачу поиска разрывов и аномалий, обосновывая критерии эффективности бизнес-функций в холакратических организационных системах на основе высокоточных векторных значений. Однако это не решает проблемы определения критериев эффективности за пределами работы графовой нейронной сети.

Характерной чертой современной организационной системы, вне зависимости от модели управления, является нарастающее по экспоненте число данных. Эти данные пронизывают все процессы организации, тем самым становятся одним из основных факторов, способствующих появлению вариаций в модели поведения организационной системы [2, с. 56]. Исследованию влияния данных на организационную систему матричного типа посвящена работа Б. Мохсен [10, с. 72]. Критика исследования заключается в отсутствии вычислений по альтернативным типам организационных систем, что свидетельствует о потребности в сегментации подходов к работе с данными в зависимости от модели управления организацией. Представленное исследование не может решить вышеописанные задачи исследования для холакратической организационной системы.

О важности работы с данными в контексте эффективного управления процессами на основе вспомогательных и экспертных систем писала О.В. Семёнова. В частности, был представлен подход по применению прогнозной аналитики для гибридных организационных систем. При таком подходе создается возможность обработки текстов на естественном языке для поиска заранее заданных аномалий в данных, но не в процессах [3, с. 156]. Однако при такой постановке невозможно измерить эффективность отдельно взятой функции организационной системы. Важно отметить, что при разработке математической модели и алгоритмов для решения задачи исследования по поиску функционально-процессных разрывов будет являться ключевым аспектом при оценке эффективности в холакратической организации. При таком подходе точность определения функционально-процессных разрывов будет являться ключевым фактором использования графовых нейронных сетей.

Методам и технологиям поиска функционально-процессных разрывов на базе графовых нейронных сетей посвящена работа Б. Хеймани с соавт. Коллектив авторов рассматривал в том числе такие типы нейронных сетей, которые предоставляют результат на базе машиночитаемого текста для простых матричных организационных систем [9, с. 5]. Ценностью данного исследования является подтверждение принципиальной возможности развития графовых нейронных сетей для решения сложных задач оптимизации в большой организации. Критика заключается в отсутствии математических моделей и представленных измеримых результатов для каскадных и гибридных организационных систем.

Аспект цифровизации процессов в гибридных организационных системах детально исследовала С.А. Чернявская с соавт. Исследование предлагает применение стратегии управления каскадной организационной системой по структурированному набору критериев. Суть предложения заключается в использовании общедоступных нейронных сетей для прогнозного моделирования параметров повышения эффективности функций и процессов с учетом большого количества данных и их вариаций ещё до реального воплощения в жизненном цикле организационной системы [4, с. 340]. Представленное исследование не дает вводные об опыте применения технологий управления вариациями и не закрывает прикладную задачу по моделированию процессов при заданных параметрах в холакратической организационной системе, таким образом, исследование носит исключительно теоретический аспект.

О вызовах для графовых нейронных сетей в разрезе функционального анализа процессов и структуры организации писала С. Бхуван. В частности, описывались способы интеграции нейронных сетей в системы оперативного управления организацией для поддержания её конкурентоспособности [6, с. 1792]. Исследование не позволило установить, что алгоритмы могут быстро выявлять закономерности, тенденции и аномалии в больших массивах данных. Коллектив зарубежных исследователей предлагал аналогичные инструменты предиктивной аналитики для прогнозирования тенденции продаж и поведения внутренних процессов [11]. Это исследование не затронуло предиктивный анализ устойчивости матричных и холакратических организационных систем с учетом постоянного изменения входных параметров в процессах.

Аналогичных результатов достиг М. Солеймани с коллективом соавторов [13, с. 5]. В качестве критики исследования можно отметить, что при таком подходе не будут снижаться коэффициенты потери полезной работы процессов холакратической организации как системы, поскольку

большинство процессов являются сквозными и найти параметры оптимизации или изменения становится сложным ввиду большого числа данных для анализа параметров изменения даже при помощи графовых нейронных сетей.

О глубоком анализе функций каскадных и гибридных организационных систем писал коллектив авторов во главе с Ч. Япрасертом [16]. Расчеты оказались недостаточными с точки зрения управления стоимостью процессов в организации. Результаты исследования не учитывают сопоставление функциональных разрывов по процессам с учетом вариаций, например, сколько разработчиков потребуется, чтобы ускорить запуск нового программного продукта. Аналогичное исследование для матричных организационных систем проводил Х. Эльмоузалами [7]. Результаты не удалось спроецировать для холакратической организации как на уровне применимости модели, так и на уровне адаптации алгоритмов. Аналогичные исследования проводили С. Бэнкинс с соавт. [5, с. 165], но их результаты нельзя применить для высокотехнологичных организаций, занимающихся разработкой программных продуктов. Поиск функционально-процессных разрывов в гибридной модели управления исследовал Ф. Франке [8, с. 2241].

Следует упомянуть группу исследователей [14, с. 12; 15, с. 5; 17; 18, с. 438; 19, с. 57; 20, с. 474], которые искали пути решения имеющихся проблем в работе с разрозненными источниками данных для применения графовых нейронных сетей под задачу поиска функционально-процессных разрывов в организационных системах. Достигнутые результаты не позволяют сформировать модель управления для холакратической организации с развитой административной структурой в условиях постоянных внешних и внутренних изменений.

С учетом исследований, ранее проведенных одним из авторов, имеет место подтверждение отсутствия эталонных методов и моделей для управления холакратическими организационными системами как на уровне методики, так и на уровне инструментария [1, с. 53]. Формирование универсального решения для всех типов организационных систем невозможно на инженерном уровне ввиду наличия функционально-процессных разрывов между существующими системами, а также особенностями функционирования таких систем.

Последствия отсутствия эталонной модели управления для организационной системы представляются в форме временных и финансовых издержек на тестирование новых процессов и вариаций их поведения без возможности унификации данных и работы с прогнозами в режиме реального времени.

Доказательство эффективности устранения функционально-процессных разрывов с использованием разработанной модели на базе графовой нейронной сети для холакратической организационной системы достигается путем проведения эксперимента в рамках реально действующих процессов.

### Апробация модели и проведение эксперимента

Для решения задачи по определению функционально-процессных разрывов в холакратической организации на примере подразделений АО «Банк «Точка» была разработана схема идентификации функционально-процессных разрывов, представленная на рис. 2.

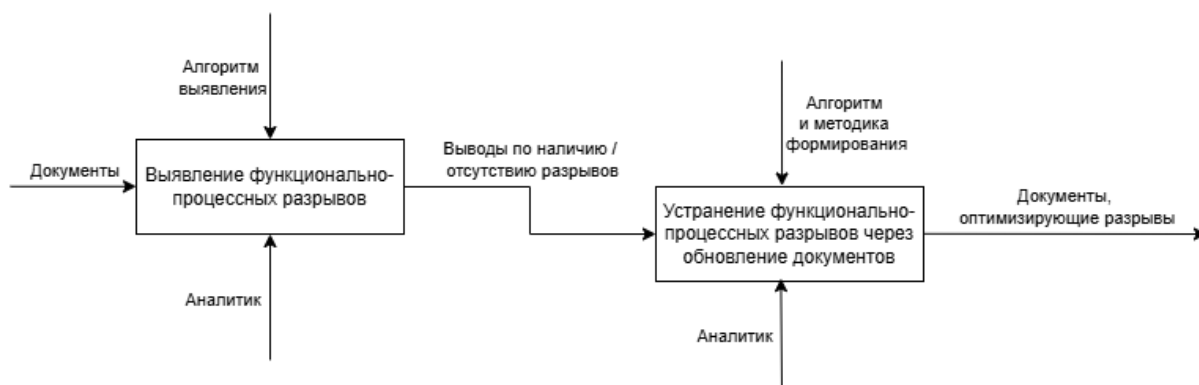


Рис. 2. Процесс обработки данных для обнаружения функционально-процессных разрывов в холакратической организационной системе

Fig. 2. Data processing process for detecting functional-process gaps in a holacratic organizational system

Модель призвана упростить процесс оптимизации внутри разветвленной холакратической организационной системы. Известно, что начальная структура организации задается при помощи метода определения управляющих органов и выпуску первичной нормативно-распорядительной документации, однако по мере развития организационной системы происходит естественный дисбаланс ввиду того, что положения о подразделениях, должностные инструкции и приказы о распределении полномочий меняются без синхронизации со структурой организации.

Для актуализации организационной структуры холакратической системы управления с точки зрения её соответствия собственным нормативно-распорядительным документам необходимо синхронизировать реальную структуру системы по документам при помощи графовой нейронной сети. Такой подход позволяет оперативно и достоверно определить, кто является владельцем процесса с последующим построением дерева функций и сравнением результатов с организационной структурой. В качестве вводных для анализа выступает окружение функции и их переплетение. Рассмотрим структуру данных и подход к их обработке на схеме (рис. 3).

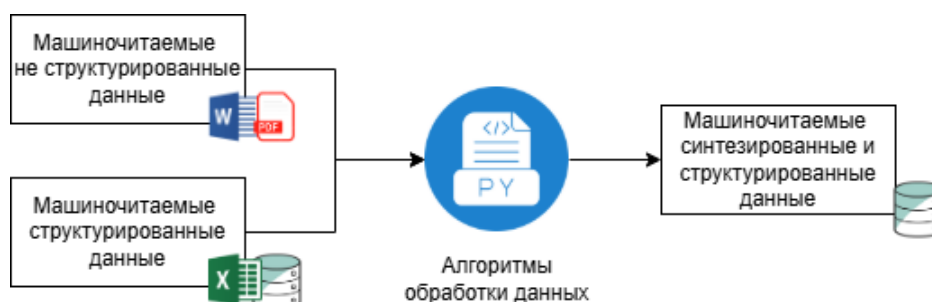


Рис. 3. Структура и подход к обработке данных  
Fig. 3. Structure and approach for data processing

Алгоритмы обработки данных нацелены на обучение оптического распознавания символов в документах. Отметим, что источниками первичных данных выступают утвержденные положения о подразделениях, должностные инструкции и приказы о распределении обязанностей в форматах doc, pdf, xls, а также базы данных на PostgreSQL. Оптическое распознавание символов происходит по заранее подготовленной модели эмбедингов, описанной во введении настоящего исследования. В рамках эксперимента были выбраны следующие структурные подразделения АО «Банк «Точка» (табл. 1).

Входные данные для эксперимента

Таблица 1

Table 1

Input data for the experiment

Название документа	Подразделение / Количество документов	
	Управление банковской инфраструктурой	Управление информационных технологий
Положение о подразделении	1 304	401
Должностные инструкции	358	185
Приказы о распределении обязанностей	36	5

Результатом анализа стало формирование маркеров по блокам управления холакратической организационной системой. Маркерами являются конкретные процессы или действия в рамках функции, например, маркирование запроса «ведет делопроизводство» и «осуществляет ведение делопроизводства».

Таким образом, можно установить связность функций при помощи маркеров со схожими векторными значениями. Установление связей между графами при помощи разработанной нейронной сети позволило сформировать дерево функций холакратической организационной системы через паросочетания – от уровня линейного исполнителя до высших уровней корпоративного управления по выделенным направлениям. Отметим принципы поиска (табл. 2).

Таблица 2

Принципы поиска функционально-процессных разрывов

Table 2

Principles of searching for functional-process gaps

№	Задача	Принцип поиска
1	Поиск функционально-процессных разрывов	
1.1	Обнаружение разрывов в каскаде функций	Выявление разрыва в каскадировании функций
1.2	Обнаружение потери функции	Функция прописана на более высоких уровнях, но не обнаружена на более низких и наоборот
1.3	Обнаружение «тупиковых» функций	Выявляются функции, которые прописаны только на более высоких уровнях и не каскадируются вниз
2	Выявление несвойственного функционала	Сравнение различных документов идентифицирует, что в положении о подразделении функции нет, а в должностных инструкциях есть
3	Уровень полномочий	Функция, закрепленная за подразделением в документах, соответствует или не соответствует уровню управления
4	Дублирование функций	Сравнение документов обнаруживает дублирование функций в разных подразделениях
5	Сравнение с эталоном	Анализ положения о подразделении на пример его соответствия эталону по выделенным критериям
6	Выявление ключевых функций	Определение ключевых и обеспечивающих функций по положению о подразделении

Далее рассмотрим процесс построения дерева функций при помощи графовой нейронной сети на схеме (рис. 4).



Рис. 4. Процесс построения дерева функций холакратической организационной системы  
Fig. 4. Process of tree of functions development for holacratic organizational system

Рассмотрим результаты эксперимента по поиску функционально-процессных разрывов на примере нескольких подразделений АО «Банк «Точка» с использованием имеющихся нормативно-распорядительных документов. На основании входных данных графовая нейронная сеть обучалась и определяла атрибуты для построения дерева функций по заданным параметрам (табл. 3).

Таблица 3

## Результаты эксперимента

Table 3

## Results of the experiment

№	Атрибут функции	Срок обучения, ч	Точность, %
1	Тип документа	164	96
2	Функциональное направление деятельности	208	96
3	Функция	125	90
4	Тип функции	186	86
5	Класс функции	160	85
6	Уровень управления	229	80
7	Регион	184	86
8	Класс функции	121	81

Достигнутые результаты позволяют определить функционально-процессные разрывы в холакратической организации по заданным атрибутам функции через установление структуры по имеющимся нормативно-распорядительным документам на достаточно высоком уровне точности. Ряд значений ниже 85 % свидетельствует о необходимости дополнительного обучения графовой нейронной сети при помощи вспомогательных данных и дополнительных документов из ранее неучтенных источников данных.

Следует упомянуть, что разработанная графовая нейронная сеть позволяет определить иерархию функций по всем уровням управления холакратической организации. Проведенный эксперимент показывает установление взаимосвязи функций по всем уровням управления в рамках подразделений, взятых в качестве объектов апробации. Взаимосвязи помогают установить, насколько уровень нормативно-распорядительной документации устарел по отношению к последнему корпоративному обновлению структуры АО «Банк «Точка».

Под функционально-процессными разрывами в АО «Банк «Точка»» понимаем процентное соотношение количества несоответствий по утвержденному набору нормативно-распорядительной документации. Рассмотрим формулу определения функционально-процессных разрывов в холакратической организационной системе:

$$E = [\sum (P_i \cdot C_i \cdot H_i \cdot K_i) \cdot \alpha + [\sum (D_j \cdot C_j \cdot H_j \cdot \beta_j) \cdot \gamma] \cdot \delta \cdot (1 + r)^t,$$

где

– процессная составляющая:

$P_i$  – коэффициент оптимизации  $i$ -го процесса (от 0 до 1);

$C_i$  – среднечасовая стоимость ресурсов в  $i$ -м процессе, руб./ч;

$H_i$  – количество часов, высвобождаемых в результате оптимизации  $i$ -го процесса;

$K_i$  – коэффициент критичности  $i$ -го процесса для общей эффективности;

$\alpha$  – коэффициент прямого воздействия процессной оптимизации;

– документооборотная составляющая:

$D_j$  – коэффициент оптимизации  $j$ -го документа (от 0 до 1);

$C_j$  – среднечасовая стоимость работы с  $j$ -м документом;

$H_j$  – количество часов, экономимых при оптимизации  $j$ -го документа;

$\beta_j$  – коэффициент влияния  $j$ -го документа на скорость процессов;

$\gamma$  – коэффициент документооборотного воздействия;

– системные коэффициенты:

$\delta$  – мультипликатор системного эффекта;

$r$  – ставка дисконтирования;

$t$  – временной период расчета;

– коэффициент оптимизации процесса ( $P_i$ ). Данный показатель рассчитывается по формуле

$$P_i = (T_{\text{до}} - T_{\text{после}}) / T_{\text{после}} \cdot Q_i,$$

где  $T_{\text{до}}$ ,  $T_{\text{после}}$  – время выполнения процесса до и после оптимизации;

$Q_i$  – коэффициент качества оптимизации, учитывающий меру устранения разрывов);

– коэффициент критичности процесса ( $K_i$ ). Определяется как взвешенная оценка:  
 $K_i = W_1 \cdot \text{Важность} + W_2 \cdot \text{Частота} + W_3 \cdot \text{Сложность} + W_4 \cdot \text{Взаимосвязанность}$ ,  
 где весовые коэффициенты  $W_n$  по умолчанию = 1;

– мультипликатор системного эффекта ( $\delta$ ) рассчитывается по формуле синергии:  
 $\delta = 1 + \ln(1 + N \cdot D \cdot S) / (N + D + S)$ ,

где  $N$  – количество оптимизированных процессов;  
 $D$  – количество оптимизированных документов;  
 $S$  – коэффициент системной интеграции.

**Практическая реализация расчета.** Первый этап – сбор исходных данных, в частности:

- инвентаризация процессов и выявление всех бизнес-процессов с функционально-процессными разрывами;
- хронометраж и измерение временных затрат на выполнение процессов до оптимизации;
- стоимостный анализ и определение среднечасовой стоимости ресурсов по каждому процессу;
- документооборотный аудит и анализ нормативно-распорядительной базы.

Второй этап – пример расчетной таблицы промежуточных показателей. Обратимся к таблице с алгоритмом расчета процессных эффектов (табл. 4).

Пример расчетных показателей промежуточных показателей

Таблица 4

Table 4

Example of temporary data calculations

Процесс	$T_{\text{до}}, \text{ч}$	$T_{\text{после}}, \text{ч}$	$P_i$	$C_i, \text{руб./ч}$
Процесс X	10	6	0,4	1 500
Процесс Y	15	9	0,4	2 000

При оценке деятельности всей организационной системы формула должна учитывать следующие корректирующие факторы:

- временной лаг – эффект, который может проявляться не сразу, требуется введение временных коэффициентов;
- сопротивление изменениям – человеческий фактор, который может снижать расчетный эффект на 10–30 %;
- технологические ограничения – это существующая ИТ-инфраструктура, которая может лимитировать потенциал оптимизации;
- регулятивные требования – это отраслевое регулирование, которое может препятствовать некоторым оптимизационным решениям;
- валидация и мониторинг результатов.

Для обеспечения точности расчетов необходима апробация формулы на ограниченном количестве процессов, регулярная корректировка коэффициентов на основе фактических данных, сравнительный анализ и отслеживание устойчивости достигнутых эффектов. Определив функционально-процессные разрывы при помощи графовой нейронной сети, можно приступить к оценке оптимизации организационной системы. Обратимся к табл. 5.

Результаты оптимизации нормативно-распорядительной документации

Таблица 5

Table 5

Results of optimization

Название документа	Подразделение / Количество обновленных документов	
	Управление банковской инфраструктурой	Управление информационных технологий
Положение о подразделении	1 238	321
Должностные инструкции	276	141
Приказы о распределении обязанностей	355	5



Расчет экономического эффекта от оптимизации 2336 документов в банковских подразделениях показал существенную экономию с учетом специфики финансового сектора и высокой стоимости банковских операций. В результате оптимизации были устранены функционально-процессные разрывы в холакратической организационной системе как на уровне структуры, так и на уровне нормативно-распорядительной документации путем синхронного обновления.

Отметим, что формула для расчета эффекта от устранения функционально-процессных разрывов должна учитывать прямую экономию от оптимизации процессов, синергетический эффект – от ускорения ритмичности исполнения процессов и мультипликативное воздействие на всю организационную систему. Обратимся к результатам (табл. 6).

Расчет экономического эффекта

Таблица 6

Economic effect calculation

Table 6

Параметр	УБИ	УИТ	Формула расчета
Средняя зарплата, руб./мес.	180 000	220 000	Рыночные данные
Коэффициент нагрузки	1,45	1,45	Соц. взносы и накладные
Рабочие часы в месяц	160	160	Стандартное покрытие
Часовая ставка, руб./ч	1 631	1 994	(Зарплата · 1,45) / 160

Для нижеследующих расчетов возьмем коэффициент оптимизации на уровне 0,4. Коэффициент влияния возьмем на уровне 0,75. Обратимся к детальным расчетам (табл. 7).

Детальный расчет по подразделениям

Таблица 7

Detailed calculation for organizational units

Table 7

Параметр	УБИ	УИТ	Формула расчета	Параметр
УБИ	Положения	1 238	0,35	1 631
УБИ	Должностные инструкции	276	0,40	1 631
УБИ	Приказы	355	0,45	1 631
УИТ	Положения	321	0,35	1 994
УИТ	Должностные инструкции	141	0,40	1 994
УИТ	Приказы	5	0,45	1 994

Важно учесть параметры системной мультипликации и дополнительных эффектов, оказывающих влияние на целевую организационную систему (табл. 8).

Системные мультипликаторы

Таблица 8

System multiplications

Table 8

Компонент	Коэф.	Расчет	Сумма, руб.	Обоснование
Базовый эффект	1,0	7 219 368 · 1,0	7 219 368	Прямая экономия
Документооборотное воздействие	1,25	7 219 368 · 0,25	1 804 842	Банковская специфика
Снижение операционных рисков	0,15	9 024 210 · 0,15	1 353 632	Регулятивные требования
Ускорение принятия решений	–	2 336 · 150 · 1,8	631 680	Улучшение процессов

Рассмотрим распределение эффекта по структурным единицам. Отметим, что ключевым ограничением полученных результатов является отсутствие возможности произвести алгоритмический расчет стоимости исполнения оптимизированных процессов при помощи графовой нейронной сети. Развитие функционала по расчету стоимости функций и эффекта оптимизации может

стать вводной информацией для следующего исследования и улучшения графовой нейронной сети. Детали представлены в табл. 9.

Распределение эффекта по подразделениям

Таблица 9

Table 9

Department dissemination effect

Подразделение	Базовый эффект, руб.	С мультипликаторами, руб.	Доля, %
Управление банковской инфраструктурой	4 581 148	5 726 435	52,8
Управление информационных технологий	2 638 220	3 297 775	30,4
Системные эффекты	–	1 985 312	16,8
ИТОГО	7 219 368	11 009 522	100

### Заключение

В результате решения задачи исследования по устранению функционально-процессных разрывов в холакратической организационной системе экспериментальным путем было доказано, что применение графовой нейронной сети в холакратической организационной системе является эффективным средством поиска функционально-процессных разрывов.

В рамках решения первой задачи исследования была сформирована математическая модель на базе графовых эмбедингов, которая учитывает особенности функционирования холакратической организационной системы на основе её нормативно-распорядительной документации.

В рамках решения второй задачи исследования получилось обогатить знания об изначальной структуре холакратической организации по имеющимся нормативно-распорядительным документам для двух подразделений АО «Банк «Точка».

В рамках решения третьей задачи исследования удалось оптимизировать работу холакратической организационной системы за счет устранения функционально-процессных разрывов через синхронизацию актуальной структуры управления с положениями о подразделениях и должностными инструкциями, тем самым повысить её эффективность за счет удаления функций, дублирующих друг друга.

В качестве вывода по итогам проведенного исследования можно сказать, что применение графовых нейронных сетей для холакратических организационных систем является эффективным инструментом оптимизации, который позволяет в короткий промежуток времени сформировать целостную картину деятельности организационной системы через каскадирование функций и поиск функционально-процессных разрывов. Дальнейшее развитие исследований в этой области может быть направлено как на прикладной аспект, через проведение новых экспериментов в холакратических организациях, так и на фундаментальном уровне через развитие математической составляющей графовой нейронной сети для получения дополнительных возможностей анализа по имеющимся наборам исходных данных об организации.

### Список литературы

1. Кротов Я.Е. Холакратические модели управления в организационных системах // Научный результат. Информационные технологии. 2024. Т. 9, № 2. С. 49–59. DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-2-0-6
2. Логиновский О.В., Голлай А.В., Дранко О.И. и др. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / под ред. О.В. Логиновского. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. (Научная мысль). DOI: 10/12737/1087996
3. Семёнова О.В. Основные аспекты управления данными в государственных и международных организациях // Социально-гуманитарные знания. 2023. № 9. С. 154–159.
4. Чернявская С.А., Михалев И.И., Мусостов З.Р. Стратегия цифровой трансформации экономических систем // Естественно-гуманитарные исследования. 2022. № 43 (5). С. 339–345. DOI: 10.24412/2309-4788-2022-43-5-339-345
5. Bankins S., Ocampo A.C., Marrone M. et al. A multilevel review of artificial intelligence in orga-

nizations: Implications for organizational behavior research and practice // Journal of Organizational Behavior. 2023. Vol. 45 (2). P. 159–182. DOI: 10.1002/job.2735

6. Bhuvan S. The impact of AI and ML on organization structure // ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts. 2024. Vol. 5 (1). P. 1787–1800. DOI: 10.29121/shodhkosh.v5.i1.2024.1922

7. Elmousalami H. Artificial Intelligence and Parametric Construction Cost Estimate Modeling: State-of-the-Art Review // Journal of Construction Engineering and Management. 2019. Vol. 146 (1). P. 03119008. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001678

8. Franke F., Franke S., Riedel R. AI-based Improvement of Decision-makers Knowledge in Production Planning and Control // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55 (10). P. 2240–2245. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.10.041

9. Khemani B., Patil S., Kotecha K., Tanwar S. A review of graph neural networks: concepts, architectures, techniques, challenges, datasets, applications and future directions // Journal of Big Data. 2024. Vol. 11 (1). P. 1–43. DOI: 10.1186/s40537-023-00876-4

10. Mohsen B.M. Big Data Application in Supply Chain Management // International Journal of Machine Learning. 2023. Vol. 13 (2). P. 70–76. DOI: 10.18178/ijml.2023.13.2.1131

11. Olawumi M.A., Oladapo B.I. AI-driven predictive models for sustainability // Journal of Environmental Management. 2025 Jan. Vol. 373. P. 123472. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123472

12. Rudko I., Bonab A.B., Bellini F. Organizational Structure and Artificial Intelligence. Modeling the Intraorganizational Response to the AI Contingency // Journal of theoretical and applied electronic commerce research. 2021. Vol. 16 (6). P. 2341–2364. DOI: 10.3390/jtaer16060129

13. Soleimani M., Naderian H., Afshinar A.H. et al. A Method for Predicting Production Costs Based on DataFusion from Multiple Sources for Industry 4.0: Trends and Applications of Machine Learning Methods // Computational Intelligence and Neuroscience. 2023. Vol. 2023 (1). P. 1–12. DOI: 10.1155/2023/6271241

14. Svabova L., Michalkova L., Durica M., Nica E. Business failure prediction for Slovak small and medium-sized companies // Sustainability. 2020. Vol. 12 (11). P. 1–14. DOI: 10.3390/su12114572

15. Wang A., Yu H. The construction and empirical analysis of the companys financial early warning model based on data mining algorithms // Journal of Mathematics. 2022. Vol. 2022 (1). P. 1–9. DOI: 10.1155/2022/3808895

16. Yaiprasert C., Hidayanto A.N. AI-powered ensemble machine learning to optimize cost strategies in logics business // International Journal of Information Management Data Insights. 2024. Vol. 4(1). P. 100209. DOI: 10.1016/j.jjime.2023.100209

17. Yang Y., Yi F., Deng C., Sun G. Performance analysis of the CHAID algorithm for accuracy // Mathematics. 2023. Vol. 11 (11). P. 2558. DOI:10.3390/math11112558

18. Zhong X., Koh I., Fricker P. Building-GNN: Exploring a co-design framework for generating controllable 3D building prototypes by graph and recurrent neural networks // International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe. 2023. P. 431–440. DOI: 10.52842/conf.eacaade.2023.2.431

19. Zhou J., Cui G., Hu S. et al. Graph neural networks: A review of methods and applications // AI Open. 2020. Vol. 1. P. 57–81. DOI: 10.1016/j.aiopen.2021.01.001

20. Zhang G., Gionis A. Regularized impurity reduction: Accurate decision trees with complexity guarantees // Data Mining and Knowledge Discovery. 2023. Vol. 37 (1). P. 434–475. DOI: 10.1007/s10618-022-00884-7

21. Zhang Y., Yang G. Application of decision tree algorithm based on clustering and entropy method level division for regional economic index selection // Data Mining and Big Data. 2020. Vol. 1234. P. 45–56. DOI: 10.1007/978-981-15-7205-0\_5

## References

1. Krotov Ya.E. Holacratic management models in organizational systems. *Research result. Information technologies*. 2024;9(2):49–59. (In Russ.) DOI: 10.18413/2518-1092-2024-9-2-0-6

2. 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.) DOI: 10.12737/1087996

3. Semenova O.V. The main aspects of data management in state and international organizations. *Social and humanitarian knowledge*. 2023;(9):154–159. (In Russ.)

4. Chernyavskaya S.A., Mikhalev I.I., Musostov Z.R. Strategy for digital transformation of economic systems. *Natural-Humanitarian Studies*. 2022;43(5):339–345. (In Russ.) DOI: 10.24412/2309-4788-2022-43-5-339-345
5. Bankins S., Ocampo A.C., Marrone M., Restubog S.L., Woo S.E. A multilevel review of artificial intelligence in organizations: Implications for organizational behavior research and practice. *Journal of Organizational Behavior*. 2023;45(2):159–182. DOI: 10.1002/job.2735
6. Bhuvan S. The impact of AI and ML on organization structure. *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts*. 2024;5(1):1787–1800. DOI: 10.29121/shodhkosh.v5.i1.2024.1922
7. Elmousalami H. Artificial Intelligence and Parametric Construction Cost Estimate Modeling: State-of-the-Art Review. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2019;146(1):03119008. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001678
8. Franke F., Franke S., Riedel R. AI-based Improvement of Decision-makers Knowledge in Production Planning and Control. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(10):2240–2245. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.10.041
9. Khemani B., Patil S., Kotecha K., Tanwar S. A review of graph neural networks: concepts, architectures, techniques, challenges, datasets, applications and future directions. *Journal of Big Data*. 2024;11(1):1–43. DOI: 10.1186/s40537-023-00876-4
10. Mohsen B.M. Big Data Application in Supply Chain Management. *International Journal of Machine Learning*. 2023;13(2):70–76. DOI: 10.18178/ijml.2023.13.2.1131
11. Olawumi M.A., Oladapo B.I. AI-driven predictive models for sustainability. *Journal of Environmental Management*. 2025 Jan.;373:123472. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123472
12. Rudko I., Bonab A.B., Bellini F. Organizational Structure and Artificial Intelligence. Modeling the Intraorganizational Response to the AI Contingency. *Journal of theoretical and applied electronic commerce research*. 2021. 16(6):2341–2364. DOI: 10.3390/jtaer16060129
13. Soleimani M., Naderian H., Afshinar A.H., Sovari Z., Tizhari M., Hosseini S.R.A.S., Kim H.-J. A Method for Predicting Production Costs Based on DataFusion from Multiple Sources for Industry 4.0: Trends and Applications of Machine Learning Methods. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2023. 2023(1):1–12. DOI: 10.1155/2023/6271241
14. Svabova L., Michalkova L., Durica M., Nica E. Business failure prediction for Slovak small and medium-sized companies. *Sustainability*. 2020;12(11):1–14. DOI: 10.3390/su12114572
15. Wang A., Yu H. The construction and empirical analysis of the companys financial early warning model based on data mining algorithms. *Journal of Mathematics*. 2022. 2022(1):1–9. DOI: 10.1155/2022/3808895
16. Yaiprasert C., Hidayanto A.N. AI-powered ensemble machine learning to optimize cost strategies in logics business. *International Journal of Information Management Data Insights*. 2024;4(1):100209. DOI: 10.1016/j.jjime.2023.100209
17. Yang Y., Yi F., Deng C., Sun G. Performance analysis of the CHAID algorithm for accuracy. *Mathematics*. 2023;11(11):2558. DOI:10.3390/math11112558
18. Zhong X., Koh I., Fricker P. Building-GNN: Exploring a co-design framework for generating controllable 3D building prototypes by graph and recurrent neural networks. In: *International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*. 2023. P. 431–440. DOI: 10.52842/conf.eacaade.2023.2.431
19. Zhou J., Cui G., Hu S., Zhang Z., Yang C., Liu Z., Wang L., Li C., Sun M. Graph neural networks: A review of methods and applications. *AI Open*. 2020;1:57–81. DOI: 10.1016/j.aiopen.2021.01.001
20. Zhang G., Gionis A. Regularized impurity reduction: Accurate decision trees with complexity guarantees. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2023;37(1):434–475. DOI:10.1007/s10618-022-00884-7
21. Zhang Y., Yang G. Application of decision tree algorithm based on clustering and entropy method level division for regional economic index selection. In: *Data Mining and Big Data*. 2020. Vol. 1234. P. 45–56. DOI: 10.1007/978-981-15-7205-0\_5

**Информация об авторах**

**Кротов Яков Евгеньевич**, аспирант факультета технологий искусственного интеллекта, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия; yakov.krotoff@gmail.com.

**Разумов Владимир Геннадьевич**, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; wisewolf7778@gmail.com.

**Information about the authors**

**Yakov E. Krotov**, Postgraduate student of the Faculty of Artificial Intelligence Technologies, ITMO University, St. Petersburg, Russia; yakov.krotoff@gmail.com.

**Vladimir G. Razumov**, Postgraduate student of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; wisewolf7778@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 03.08.2025**

**The article was submitted 03.08.2025**

## Краткие сообщения Brief reports

Краткое сообщение  
УДК 338.274.3; 004.85  
DOI: 10.14529/ctcr250409

### КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СПРОСА НА ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫЕ ТОВАРЫ НА ОСНОВЕ АНСАМБЛЯ LSTM-СЕТИ И SARIMA-МОДЕЛИ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ В ERP-СИСТЕМЫ РОССИЙСКОГО РИТЕЙЛА

**А.А. Микрюков**<sup>1</sup>, 9127771067@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4664-6911>

**Д.В. Гилёв**<sup>2</sup>, denis.gilev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1040-5696>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

**Аннотация.** Цель исследования: повышение точности прогнозирования спроса на продовольственные товары в условиях высокой волатильности и сложной сезонной структуры для последующей интеграции в модули управления запасами ERP-систем, включая российские решения на платформе «1С». **Материалы и методы.** Предложен комбинированный метод на основе ансамбля SARIMA (англ. Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average – сезонная авторегрессионная модель скользящего среднего) и многослойной LSTM-сети (англ. Long Short-Term Memory – сеть долгой краткосрочной памяти). Веса моделей определяются адаптивно на основе ошибки на валидационной выборке. Эксперимент проведён на реальных данных соревнования M5 Forecasting (Walmart), включающих временные ряды спроса по 120 наименованиям продуктов питания. Для оценки качества использованы метрики MAE, RMSE, MAPE и тест Дибальда – Мариано. **Результаты.** Предложенный ансамбль снижает среднюю абсолютную процентную ошибку (MAPE) до 52,96 % – на 1,1 % лучше SARIMA и на 14,0 % лучше LSTM. Статистическая значимость улучшения подтверждена тестом Дибальда – Мариано ( $p < 0,001$ ). Анализ показал, что комбинация линейной интерпретируемости SARIMA и нелинейной гибкости LSTM обеспечивает устойчивость к выбросам и повышает точность в периоды резких колебаний спроса (например, перед праздниками). Практическая ценность работы заключается в возможности снижения уровня дефицита и избыточных запасов за счёт более точного прогноза спроса. **Заключение.** Разработанный метод демонстрирует высокий потенциал для интеграции в ERP-системы российского ритейла, где требуется баланс между точностью, интерпретируемостью и автоматизацией. Результаты позволяют рекомендовать ансамбль для внедрения в модули автоматизированного планирования закупок и управления товарными запасами.

**Ключевые слова:** прогнозирование спроса, машинное обучение, SARIMA, LSTM-сеть, ансамблевые модели, ERP-системы, управление товарными запасами, временные ряды

**Для цитирования:** 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

Brief report

DOI: 10.14529/ctcr250409

**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****A.A. Mikryukov**<sup>1</sup>, 9127771067@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4664-6911>**D.V. Gilev**<sup>2</sup>, denis.gilev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1040-5696><sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia<sup>2</sup> Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

**Abstract. The purpose of the study.** To improve the accuracy of food demand forecasting under conditions of high volatility and complex seasonality for integration into inventory management modules of ERP systems, including Russian solutions based on the 1C platform. **Materials and methods.** A hybrid method is proposed based on an ensemble of SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) and a multilayer LSTM network (Long Short-Term Memory). Model weights are determined adaptively based on validation error. The experiment was conducted on real data from the M5 Forecasting Competition (Walmart), covering demand time series for 120 food products. Evaluation metrics included MAE, RMSE, MAPE, and the Diebold–Mariano test. **Results.** The proposed ensemble reduces Mean Absolute Percentage Error (MAPE) to 52.96 % – 1.1 % better than SARIMA and 14.0 % better than LSTM. Statistical significance of the improvement was confirmed by the Diebold–Mariano test ( $p < 0.001$ ). The combination of SARIMA’s interpretability and LSTM’s nonlinear flexibility provides robustness to outliers and higher accuracy during sharp demand fluctuations (e.g., before holidays). The practical value of the study lies in the possibility of reducing the level of shortages and excess stocks through a more accurate demand forecast. **Conclusion.** The developed method shows strong potential for integration into ERP systems used in Russian retail, where a balance between accuracy, interpretability, and automation is essential. The results support the practical adoption of the ensemble in automated procurement and inventory planning modules.

**Keywords:** demand forecasting, machine learning, SARIMA, LSTM network, ensemble models, ERP systems, inventory management, time series

**For citation:** 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

**Введение**

Одной из ключевых задач в управлении цепочками поставок розничной торговли является минимизация издержек при одновременном обеспечении высокого уровня сервиса. В российской практике эта задача всё чаще решается в рамках ERP-систем, среди которых доминирующее положение занимает платформа «1С» – в частности, конфигурации «1С: Управление торговлей» и «1С: ERP Управление предприятием». Центральным элементом таких систем является модуль прогнозирования спроса, от точности которого напрямую зависит эффективность управления товарными запасами [1].

Традиционные статистические методы, такие как SARIMA, ценятся за интерпретируемость и устойчивость к переобучению [2], но не всегда достаточно хорошо справляются с нелинейными паттернами. В то же время нейросетевые подходы, особенно LSTM-сети, способны улавливать сложные временные зависимости [3], но склонны к переобучению на коротких или разреженных рядах и работают как «чёрный ящик» [4]. В условиях ERP-среды, где важны как точность, так и прозрачность решений, особенно актуальным становится гибридный подход. Идея комбинирования статистических и нейросетевых моделей впервые была предложена Zhang [5] и активно развивается в последние годы [6]. Современные исследования подтверждают, что эффективное прогнозирование требует интеграции разнородных методов, учёта теоретических основ и эмпирических особенностей данных [7, 8]. Однако остаются открытыми вопросы адаптивного взвешива-

ния компонентов ансамбля и его масштабируемости на тысячи номенклатурных единиц – типичную для ERP-систем нагрузку.

Цель данной работы – разработать и экспериментально оценить комбинированный метод прогнозирования спроса на основе ансамбля SARIMA-модели и LSTM-сети с адаптивным взвешиванием, ориентированный на интеграцию в ERP-системы российского ритейла.

## 1. Материалы и методы

В эксперименте использованы данные соревнования M5 Forecasting – Accuracy, организованного Walmart и доступного на платформе Kaggle [9]. Данные охватывают период с 2011 по 2016 г. и включают:

- ежедневные продажи более чем по 30 000 товарным единицам;
- информацию о магазинах, категориях, департаментах;
- календарные события, промоакции, цены.

Для исследования была выбрана подвыборка из 120 наименований из категории «Food» (мясные и молочные продукты, хлебобулочные изделия и т. д.), характеризующихся выраженной недельной сезонностью и умеренной волатильностью.

### 1.1. Методология

#### 1.1.1. SARIMA-модель

Модель SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)[s] применяется для описания линейных компонент ряда. Для ежедневных данных выбрано значение сезонности  $s = 7$ . Параметры модели подбирались автоматически с использованием библиотеки pmdarima на основе минимизации AIC (англ. Akaike Information Criterion – информационный критерий Акаике) в соответствии с рекомендациями классических работ по анализу временных рядов [2, 10].

#### 1.1.2. LSTM-сеть использовалась двухслойная LSTM-архитектура:

- вход: скользящее окно длиной 90 дней;
- скрытые слои: 50 и 25 LSTM-ячеек;
- выход: полносвязный слой (Dense) для прогноза на 7 дней;
- функция активации: ReLU;
- оптимизатор: Adam, скорость обучения 0.001;
- регуляризация: dropout 0.2, early stopping при отсутствии улучшения на 10 эпох.

Данные нормализовались методом Min-Max. Архитектура основана на фундаментальной работе Hochreiter & Schmidhuber [3] и современных обзорах по применению рекуррентных сетей в прогнозировании временных рядов [4].

#### 1.1.3. Архитектура ансамбля «Финальный прогноз» формируется как взвешенная сумма:

$$\hat{Y}_t^{\text{ensemble}} = \alpha \cdot \hat{y}_t^{\text{SARIMA}} + (1 - \alpha) \cdot \hat{y}_t^{\text{LSTM}}.$$

Значение веса  $\alpha \in [0,1]$  определяется путём минимизации MAE на валидационной выборке. Такой подход обеспечивает баланс между интерпретируемостью и адаптивностью, позволяя модели автоматически определять, какая из компонент более надёжна в текущих условиях.

#### 1.1.4. Метрики оценки

Для оценки качества прогнозов использовались следующие метрики: MAE (англ. Mean Absolute Error – средняя абсолютная ошибка). RMSE (англ. Root Mean Square Error – корень из среднеквадратичной ошибки). MAPE (англ. Mean Absolute Percentage Error – средняя абсолютная процентная ошибка). Тест Дибальда – Мариано (Diebold-Mariano test) – для проверки статистической значимости различий между моделями [11].

## 2. Результаты

### 2.1. Подготовка данных

Временной ряд одного товара (например, FOODS\_3\_090) был разделён на выборки:

- Train: 1147 дней (60 %);
- Val: 383 дня (20 %);
- Test: 383 дня (20 %).

Такое разделение позволяет обеспечить достаточный объём данных для обучения и валидации, а также адекватную оценку качества на независимой тестовой выборке, соответствует стандартным практикам временных рядов и рекомендациям из [10, 12].



## 2.2. Оптимизация веса ансамбля

Вес  $\alpha$  был подобран на валидационной выборке. Оптимальное значение:

$$\alpha = 0,553.$$

Это означает, что SARIMA и LSTM вносят примерно равный вклад в финальный прогноз. Такой результат свидетельствует о том, что ни одна из моделей не доминирует, а их комбинация позволяет компенсировать слабые стороны каждой.

## 2.3. Сравнение моделей

Сравнение моделей по метрикам качества (среднее по 120 ассортиментным позициям)  
Comparison of models by quality metrics (average for 120 product lines)

МОДЕЛЬ	MAE	RMSE	MAPE, %
SARIMA	23,446	32,881	53,524
LSTM	19,077	26,093	61,576
Ансамбль (предложенный)	19,725	27,723	52,956

Источник: составлено автором.

Анализ (см. таблицу) показывает, что ансамбль обеспечивает наилучшую точность по MAPE – на 1,1 %, лучше SARIMA и на 14,0 % лучше LSTM. При этом MAE и RMSE ансамбля близки к результатам LSTM, что указывает на стабильность прогноза. Стоит отметить, что MAPE у LSTM оказался выше, чем у SARIMA, что может быть связано с повышенной чувствительностью LSTM к резким скачкам спроса, которые интерпретируются как выбросы. В то же время ансамбль демонстрирует более сглаженное поведение, что делает его более устойчивым к таким колебаниям.

## 2.4. Статистическая проверка

Для оценки значимости использован тест Дибальда – Мариано [11]:

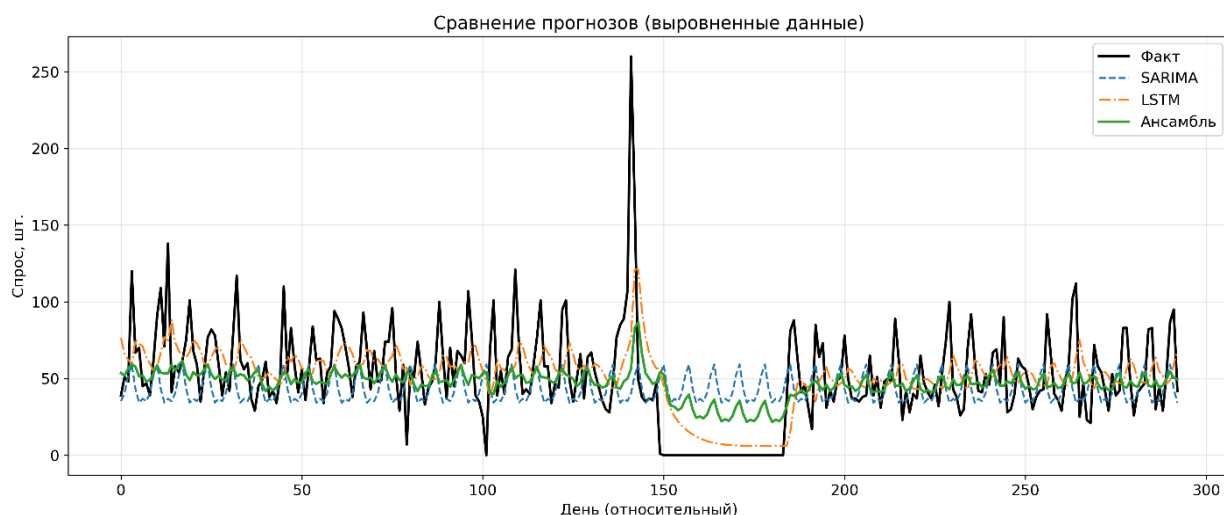
– DM-статистика: 4,476;

– p-value: < 0,001.

Нулевая гипотеза отвергается на уровне  $\alpha = 0,05$  – ансамбль статистически значимо лучше SARIMA. Это подтверждает, что улучшение точности не является случайным и имеет практическую значимость.

## 2.5. Визуализация прогнозов

На рисунке представлено сравнение прогнозов моделей на тестовом участке для одного из товаров.



Сравнение прогнозов моделей (номенклатурная единица «Packaged Meat» («Мясо в упаковке»))  
Comparison of model predictions (SKU: "Packaged Meat")

Предложенный подход эффективно сочетает линейную интерпретацию SARIMA и нелинейную аппроксимацию LSTM. Особенно значительное повышение точности наблюдается в перио-

дах резких изменений спроса (например, перед праздниками), где LSTM компенсирует систематическую ошибку SARIMA. Однако ансамбль требует большего времени на настройку. Для масштабирования на тысячи наименований товарных единиц целесообразно реализовать автоматизированный процесс подбора весов, позволяющий обрабатывать каждый временной ряд без участия оператора. Также следует отметить, что при отсутствии данных о промоакциях точность снижается на 25–30 %, что указывает на важность включения экзогенных факторов в будущих модификациях [9, 13]. Важным аспектом является и интерпретируемость модели. В отличие от «чёрного ящика» LSTM ансамбль позволяет оценить вклад каждой компоненты, что важно для принятия управленческих решений [1, 14].

### Выводы

Разработан и экспериментально оценен комбинированный метод прогнозирования спроса на основе ансамбля SARIMA и LSTM с адаптивным взвешиванием. На реальных данных M5 Competition показано, что ансамбль снижает MAPE до 52,96 % – на 1,1 % лучше SARIMA и на 14,0 % лучше LSTM. Статистическая значимость улучшения подтверждена тестом Дибальда – Мариано ( $p < 0,001$ ). Полученные результаты позволяют рекомендовать предложенный метод для внедрения в ERP – системы российского ритейла использующие модули планирования закупок и управления товарными запасами [1, 14, 15].

Перспективы дальнейших исследований:

- включение экзогенных переменных (промо, погода, календарь);
- онлайн-обучение и адаптация весов в реальном времени;
- интеграция с модулями управления нормативами запасов в ERP-системах [16].

### Список литературы

1. Więcek P., Kubek D. The Impact Time Series Selected Characteristics on the Fuel Demand Forecasting Effectiveness Based on Autoregressive Models and Markov Chains // *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 16. P. 4163. DOI: 10.3390/en17164163
2. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 4th ed. Wiley, 2008. 746 p.
3. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // *Neural Computation*. 1997. Vol. 9, no. 8. P. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
4. Exogenous Data for Load Forecasting: A Review / R. Christen, L. Mazzola, A. Denzler, E. Portmann // *Proceedings of the 12th International Conference on Data Science, Technology and Applications (DATA 2023)*. 2023. P. 489–500. DOI: 10.5220/0010213204890500
5. Zhang G.P. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model // *Neurocomputing*. 2003. Vol. 50. P. 159–175. DOI: 10.1016/S0925-2312(01)00702-0
6. Smyl S. A hybrid method of exponential smoothing and recurrent neural networks for time series forecasting // *International Journal of Forecasting*. 2020. Vol. 36, no. 1. P. 75–85. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2019.03.017
7. Forecasting: theory and practice / F. Petropoulos, D. Apiletti, V. Assimakopoulos et al. // *International Journal of Forecasting*. 2022. Vol. 38, no. 3. P. 705–871. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2021.11.001
8. Ord J.K., Fildes B., Kourentzes N. Principles of Business Forecasting. 2nd ed. Wessex Press, 2017. 550 p.
9. M5 Competition: Forecasting Accuracy. Kaggle. URL: <https://www.kaggle.com/c/m5-forecasting-accuracy/data> (дата обращения: 05.04.2025).
10. Hyndman R.J., Athanasopoulos G. Forecasting: principles and practice. 2nd ed. Melbourne: OTexts, 2021. 422 p. URL: <https://otexts.com/fpp2/>.
11. Diebold F.X., Mariano R.S. Comparing predictive accuracy // *Journal of Business & Economic Statistics*. 1995. Vol. 13, no. 3. P. 253–263. DOI: 10.1080/07350015.1995.10524599
12. Makridakis S., Spiliotis E., Assimakopoulos V. The M5 competition: Background, organization, and implementation // *International Journal of Forecasting*. 2022. Vol. 38, no. 4. P. 1325–1336. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2021.07.007
13. Implementation of Models for Demand Forecasting for e-Commerce using Time Series Forecasting / N. Yadav, A. Roushan, V. Singh et al. // *2024 Second International Conference*

on Advanced Computing & Communication Technologies (ICACCTech). 2024. DOI: 10.1109/ICACCTech65084.2024.00020

14. Enhancing manufacturing productivity: A review of AI-Driven supply chain management optimization and ERP systems integration / O.A. Adenekan, N.O. Solomon, P. Simpa, S.C. Obasi // *International Journal of Modern Engineering Research*. 2024. Vol. 6, no. 5. DOI: 10.51594/ijmer.v6i5.1126

15. Tulli S.K.C. Comparative Analysis of Traditional and AI-based Demand Forecasting Models // *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*. 2020. Vol. 07, no. 03. P. 6842–6847. DOI: 10.18535/ijetst/v7i6.02

16. Analysis of the Effectiveness of ARIMA, SARIMA, and SVR Models in Time Series Forecasting: A Case Study of Wind Farm Energy Production / K. Szostek, D. Mazur, G. Drałus, J. Kuszniier // *Energies*. 2024. Vol. 17 (19). P. 4803. DOI: 10.3390/en17194803

### References

1. Więcek P., Kubek D. The Impact Time Series Selected Characteristics on the Fuel Demand Forecasting Effectiveness Based on Autoregressive Models and Markov Chains. *Energies*. 2024;17(16):4163. DOI: 10.3390/en17164163

2. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 4th ed. Wiley, 2008. 746 p.

3. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Computation*. 1997;9(8):1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735

4. Christen R., Mazzola L., Denzler A., Portmann E. Exogenous Data for Load Forecasting: A Review. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Data Science, Technology and Applications (DATA 2023)*. 2023. P. 489–500. DOI: 10.5220/0010213204890500

5. Zhang G.P. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*. 2003;50:159–175. DOI: 10.1016/S0925-2312(01)00702-0

6. Smyl S. A hybrid method of exponential smoothing and recurrent neural networks for time series forecasting. *International Journal of Forecasting*. 2020;36(1):75–85. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2019.03.017

7. Petropoulos F., Apiletti D., Assimakopoulos V. et al. Forecasting: theory and practice. *International Journal of Forecasting*. 2022. Vol. 38, no. 3. P. 705–871. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2021.11.001

8. Ord J.K., Fildes B., Kourentzes N. *Principles of Business Forecasting*. 2nd ed. Wessex Press, 2017. 550 p.

9. M5 Competition: Forecasting Accuracy. Kaggle. Available at: <https://www.kaggle.com/c/m5-forecasting-accuracy/data> (accessed 05.04.2025)

10. Hyndman R.J., Athanasopoulos G. *Forecasting: principles and practice*. 2nd ed. Melbourne: OTexts, 2021. 422 p. URL: <https://otexts.com/fpp2/>.

11. Diebold F.X., Mariano R.S. Comparing predictive accuracy. *Journal of Business & Economic Statistics*. 1995;13(3):253–263. DOI: 10.1080/07350015.1995.10524599

12. Makridakis S., Spiliotis E., Assimakopoulos V. The M5 competition: Background, organization, and implementation. *International Journal of Forecasting*. 2022;38(4):1325–1336. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2021.07.007

13. Yadav N., Roushan A., Singh V., Kumari N., Diksha. Implementation of Models for Demand Forecasting for e-Commerce using Time Series Forecasting. In: *2024 Second International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies (ICACCTech)*. 2024. DOI: 10.1109/ICACCTech65084.2024.00020

14. Adenekan O.A., Solomon N.O., Simpa P., Obasi S.C. Enhancing manufacturing productivity: A review of AI-Driven supply chain management optimization and ERP systems integration. *International Journal of Modern Engineering Research*. 2024;6(5). DOI: 10.51594/ijmer.v6i5.1126

15. Tulli S.K.C. Comparative Analysis of Traditional and AI-based Demand Forecasting Models. *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*. 2020;07(03). 6842–6847. DOI: 10.18535/ijetst/v7i6.02

16. Szostek K., Mazur D., Drałus G., Kuszniier J. Analysis of the Effectiveness of ARIMA, SARIMA, and SVR Models in Time Series Forecasting: A Case Study of Wind Farm Energy Production. *Energies*. 2024;17(19):4803. DOI: 10.3390/en17194803

***Информация об авторах***

**Микрюков Алексей Александрович**, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; 9127771067@mail.ru.

**Гилёв Денис Викторович**, канд. техн. наук, доц. кафедры экономики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия; denis.gilev@urfu.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.

**Denis V. Gilev**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Economics, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia; denis.gilev@urfu.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 23.06.2025***

***The article was submitted 23.06.2025***

## 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 ВИНИТИ. 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»  
2025. Том 25, № 4

16+

Редактор *С.И. Уварова*  
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 31.10.2025. Дата выхода в свет 19.11.2025. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 15,34. Тираж 500 экз. Заказ 263/278. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.