

# ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ

PROCEEDINGS IN CYBERNETICS

12+



**БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ  
«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ  
PROCEEDINGS IN CYBERNETICS**

Научный журнал

**ТОМ 24, № 3**

**Сургут  
2025**

**Учредитель и издатель**  
Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры  
«Сургутский государственный университет»

**Главный редактор**  
Острейковский Владислав Алексеевич, д. т. н., профессор

**Заместитель главного редактора**  
Тараканов Дмитрий Викторович, к. т. н., доцент

**Ответственный секретарь**  
Брагинский Михаил Яковлевич, к. т. н., доцент

**Члены редакционной коллегии:**  
Советов Б. Я., академик РАН и РАО, д. т. н., профессор  
Юсупов Р. М., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор  
Абрамов О. В., д. т. н., профессор  
Анохин А. Н., д. т. н., профессор  
Антонов А. В., д. т. н., профессор  
Бурханов Р. А., д. филос. н., профессор  
Бушмелева К. И., д. т. н., профессор  
Гетман А. Ф., д. т. н., профессор  
Григорьев Л. И., д. т. н., профессор  
Древс Ю. Г., д. т. н., профессор  
Ельников А. В., д. ф.-м. н., профессор  
Инютин С. А., д. т. н., профессор  
Каштанов В. А., д. ф.-м. н., профессор  
Керимов Т. Х., д. филос. н., профессор  
Крамаров С. О., д. ф.-м. н., профессор  
Леонов Д. Г., д. т. н., профессор  
Малышев Д. С., д. ф.-м. н., профессор  
Мельников А. В., д. т. н., профессор  
Певзнер Л. Д., д. т. н., профессор  
Увайсов С. У., д. т. н., профессор  
Цибульский В. Р., д. т. н., профессор  
Юрков Н. К., д. т. н., профессор

**Выпускающий редактор**  
Завьялова Ю. А.  
**Редактор**  
Зелексон Л. А.  
**Верстка**  
Чорньенского С. И.  
**Переводчики**  
Бенская М. О., Кондратьева В. А.

**Рисунок на обложке:**  
Визуализация магнитогидродинамических расчетов для точного решения внутри сферы  
© Галкин В. А., Гореликов А. В.

Решением Высшей аттестационной комиссии с 29 мая 2017 года 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». С 29.03.2022 издание принимает к публикации статьи по следующим научным специальностям: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации

Эл № ФС77-83015 от 31.03.2022.

Издается с 2002 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:  
БУ ВО «Сургутский государственный университет»,  
628412, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1  
Тел.: +7 (3462) 76-29-88, факс: +7 (3462) 76-29-29, email: proceed.cyber@mail.ru. Сайт: vestcyber.ru

**Founder and Publisher**  
Surgut State University

**Chief Editor**

Prof. Vladislav A. Ostreikovskiy, Doctor of Sciences (Engineering)

**Vice Chief Editor**

Dmitry V. Tarakanov, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

**Executive Editor**

Mikhail Ya. Braginsky, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

**Editorial Board:**

Prof. Sovetov B. Ya., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS),  
the Russian Academy of Education (RAE)

Prof. Yusupov R. M., Doctor of Sciences (Engineering),  
member of the Russian Academy of Sciences (RAS)

Prof. Abramov O. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Anokhin A. N., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Antonov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Burkhanov R. A., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Bushmeleva K. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Getman A. F., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Grigoryev L. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Drevs Yu. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Elnikov A. V., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Inyutin S. A., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Kashtanov V. A., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Kerimov T. Kh., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Kramarov S. O., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Leonov D. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Malyshev D. S., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Melnikov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Pevzner L. D., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Uvaisov S. U., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Tsibulsky V. R., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Yurkov N. K., Doctor of Sciences (Engineering)

**Publishing Editor**

Zavyalova Yu. A.

**Editor**

Zelexson L. A.

**Layout**

Chornenkiy S. I.

**Translators**

Benskaya M. O., Kondrateva V. A.

**Cover Image:**

A visualization of magnetohydrodynamic analysis used to find an exact solution within a sphere

© Galkin V. A., Gorelikov A. V.

Since March 29, 2017, the journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals  
of the Higher Attestation Commission, which publishes main scientific results of Doctor's and Candidate's theses.

Since March 29, 2022, the journal is included in the List on the following subject groups:

- 2.3.1. System Analysis, Data Management and Processing; 1.2.2. Mathematical Modeling, Calculus and Program Complexes;  
2.2.2. Electronic Component Base of Micro- and Nanoelectronics, Quantum Devices.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and  
Mass Media. Mass media registration certificate EI No. FS77-83015 of March 31, 2022.

Published since 2002. 4 issues per year.

**Editorial Board Address:**

Surgut State University, Russia, 628412, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra, Surgut, Lenina pr., 1

Tel.: +7 (3462) 76-29-88, fax: +7 (3462) 76-29-29, email: proceed.cyber@mail.ru. Web: vestcyber.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Богнюков А. А., Зорькин Д. Ю., Самофалова Л. В.</i> Разработка системы бронирования железнодорожных билетов с использованием Java Swing.....	6
<i>Дёмко А. И.</i> Система сигналов на основе кодов Задова – Чу. Часть 1. Автокорреляционные свойства.....	17
<i>Дёмко А. И.</i> Система сигналов на основе кодов Задова – Чу. Часть 2. Взаимокорреляционные свойства .....	26
<i>Запезалова Л. Ю., Валуев С. И., Запезалов А. В.</i> Имитационное моделирование в задачах реорганизации и анализа дорожного движения.....	34
<i>Золотарева Н. С.</i> Анализ сложности арифметических операций в модулярной системе счисления квадратичного диапазона .....	44
<i>Кашковский В. В., Устинов В. В.</i> Методика расчета балльных оценок за технику пилотирования по результатам записей бортовых регистраторов .....	55
<i>Комаров В. Н., Ерохин В. В., Роцин С. М.</i> Разработка методики мониторинга и оценки контента веб-сайтов общеобразовательных организаций для повышения их информационного наполнения .....	63
<i>Поляков В. С., Авдеюк О. А., Никулин Р. Н.</i> Представление сетей Петри в матрично-предикатном виде.....	72
<i>Романов С. С., Зорькин Д. Ю., Клячина Н. В.</i> Автоматизация учета вин: проектирование и реализация информационной системы на Java Swing.....	79

### ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Алексеев М. М., Семенов О. Ю.</i> Исследование интенсивности теплообмена прямого и обращенного пламени на продольном стабилизаторе .....	91
--	----

## CONTENTS

### ENGINEERING

<i>Bognyukov A. A., Zorkin D. Yu., Samofalova L. V.</i> Development of railway ticket booking system using Java Swing.....	6
<i>Dyomko A. I.</i> Signal system based on Zadoff–Chu sequence. Part 1. Autocorrelation properties .....	17
<i>Dyomko A. I.</i> Signal system based on Zadoff–Chu sequence. Part 2. Cross-correlation properties.....	26
<i>Zapevalova L. Yu., Valuev S. I., Zapevalov A. V.</i> Simulation modeling in traffic reorganization and analysis.....	34
<i>Zolotareva N. S.</i> Arithmetic operations' complexity analysis in modular arithmetic within quadratic range.....	44
<i>Kashkovsky V. V., Ustinov V. V.</i> Assessment methods for scores of flight technique based on flight recorders records.....	55
<i>Komarov V. N., Erokhin V. V., Roshchin S. M.</i> Monitoring methods and assessment of educational organizations' websites to enhance their content.....	63
<i>Polyakov V. S., Avdeyuk O. A., Nikulin R. N.</i> Representation of Petri nets in matrix-predicate form.....	72
<i>Romanov S. S., Zorkin D. Yu., Klyachina N. V.</i> Wine accounting automation: Information system design and implementation using Java Swing.....	79

### PHYSICS AND MATHEMATICS

<i>Alekseev M. M., Semenov O. Yu.</i> Study on heat exchange rate of direct and inverted flame on longitudinal flame holder.....	91
---	----

Научная статья

УДК 656.072.1:004.438Java Swing

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-1>



### Разработка системы бронирования железнодорожных билетов с использованием Java Swing

*Александр Алексеевич Богнюков<sup>✉</sup>, Дмитрий Юрьевич Зорькин,  
Лариса Валентиновна Самофалова*

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия*

**Аннотация.** В данной статье представлена разработка информационной системы для онлайн-бронирования железнодорожных билетов на языке Java с использованием библиотеки Swing. Цель работы – решение задач цифровизации транспортных услуг, обеспечивающей пользователям удобство, скорость и надежность. В статье сформулированы функциональные требования к системе (регистрация, поиск маршрутов, управление бронированиями) и детально описана архитектура на основе объектно-ориентированного программирования. Проектирование включает интуитивный графический интерфейс с валидацией данных, динамическим обновлением списка мест и модулем просмотра фотоальбома вокзалов. Визуализация структуры системы выполнена с помощью диаграмм использования вариантов. Модульность и кросс-платформенность обеспечивается благодаря компонентам Swing. Данные хранятся в файлах для хранения структурированных табличных данных, что упрощает интеграцию. Тестирование подтвердило корректность работы модулей, включая обработку исключений и синхронизацию операций. Практическая значимость заключается в возможности внедрения системы в реальные сервисы. Перспективы развития: интеграция с интерфейсом прикладного программирования, мобильная версия, рекомендательные алгоритмы и переход на облачные базы данных. Результаты демонстрируют эффективность Java Swing для создания сложных приложений с графическим интерфейсом в транспортной логистике.

**Ключевые слова:** Java Swing, бронирование билетов, железнодорожный транспорт, GUI, информационные системы, программирование, UML

**Для цитирования:** Богнюков А. А., Зорькин Д. Ю., Самофалова Л. В. Разработка системы бронирования железнодорожных билетов с использованием Java Swing // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 3. С. 6–16. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-1>.

Original article

### Development of railway ticket booking system using Java Swing

*Aleksandr A. Bognyukov<sup>✉</sup>, Dmitry Yu. Zorkin, Larisa V. Samofalova*  
*Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia*

**Abstract.** The paper presents the development of an information system for online railway tickets booking in Java Swing library. The goal is to provide users with convenient, fast and reliable service by solving problems in transport services' digitalization. The authors indicate the functional specifications for the system (registration, route search, booking management) and specify the object-oriented programming architecture. The design includes an intuitive graphical interface with data validation, dynamic updating of the locations' list and a module for viewing the train stations' photo album. Unified modeling language (UML) diagrams create a visualization of the system structure. The modularity and cross-platform compatibility are provided through the use of Swing components. Comma-separated values (CSV) store the data, thus simplifying integration. Testing confirms the correct operation of the modules, including exception handling and operations' synchronization.

The system's integration into real services has practical significance. Prospects involve integrating with Application programming interface (API) payment methods, having a mobile version, employing recommendation algorithms, and switching to cloud databases. The results demonstrate the Java Swing effectiveness for developing graphical user interface (GUI) applications in transport logistics.

**Keywords:** Java Swing, ticket booking, railway transport, GUI, information systems, programming, UML

**For citation:** Bognyukov A. A., Zorkin D. Yu., Samofalova L. V. Development of railway ticket booking system using Java Swing. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(3):6–16. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-1>.

## ВВЕДЕНИЕ

Нынешняя эпоха информационных технологий диктует высокие требования к качеству и удобству пользовательских приложений, особенно в сфере автоматизации повседневных сервисов. Одной из актуальных областей является организация онлайн-бронирования транспортных средств, где удобный и интуитивно понятный интерфейс играет решающую роль в повышении удовлетворенности пользователей и оптимизации рабочих процессов. Разработка графического пользовательского интерфейса для бронирования железнодорожных билетов представляет собой важную задачу, которая требует объединения современных методов проектирования программного обеспечения с практическими потребностями транспортной отрасли [1].

Постановка задачи заключается в разработке приложения для бронирования железнодорожных билетов, обеспечивающего удобство и надежность работы пользователей. Система реализует регистрацию и авторизацию, выбор маршрута, даты поездки, типа вагона и места, а также управление бронированиями.

Для создания графического интерфейса используется Java Swing, обеспечивая гибкость и масштабируемость системы. Особое внимание уделяется навигации между основными разделами: главным меню, формами входа и регистрации, экраном бронирования и личным кабинетом. Также предусмотрены функции просмотра забронированных билетов, их отмены и проверки статуса поездов.

В ходе разработки создаются диаграммы использования вариантов (UML-диаграммы) для визуализации архитектуры системы,

а также анализируются существующие решения в сфере бронирования. Разработка демонстрирует применение принципов объектно-ориентированного программирования (ООП) и интеграцию различных модулей, что позволяет адаптировать систему к изменяющимся требованиям рынка.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведенный обзор подтвердил эффективность объектно-ориентированного подхода и Java Swing для разработки приложений с графическим интерфейсом (GUI-приложений) в транспортной сфере [2, 3]. Исследования К. Коузена (2018) и И. А. Баркова (2023) демонстрируют, что ООП обеспечивает гибкость и масштабируемость систем бронирования. Данная научная работа [4] выделяет потенциал интеграции с облачными сервисами для обработки больших данных, что актуально для цифровизации транспортных услуг. Указанные методы легли в основу архитектуры системы, сочетающей классические принципы ООП с современными требованиями к модульности.

Разработан интуитивный интерфейс с ключевыми модулями:

1. Главное меню (навигация по разделам).
2. Формы входа/регистрации (с валидацией данных).
3. Экран бронирования (динамический выбор параметров).
4. Личный кабинет (управление заказами).

Использованы стандартные компоненты Swing для обеспечения кросс-платформенности и отзывчивости.

Диаграмма вариантов использования (или use case diagram) является одним из важных инструментов моделирования в методологии

Unified Modeling Language (UML). Она используется для описания функциональности системы с точки зрения ее взаимодействия с внешними сущностями, называемыми акторами. Акторы представляют роли, которые взаимодействуют с системой, и могут быть как людьми, так и внешними системами.

Диаграмма вариантов использования помогает установить, как различные виды пользователей будут взаимодействовать с системой и какие действия они совершат [4]. Это позволяет лучше понять требования к системе, определить основные функциональные возможности и обеспечить их соответствие потребностям пользователей [5] (рис. 1).

Основной поток:

1. Вариант использования начинается, когда Гость заходит в приложение.
2. Если Гость не зарегистрирован, он выполняет регистрацию, вводя e-mail, имя пользователя и пароль. Если же Гость уже имеет аккаунт, этот шаг пропускается, и пользова-

тель переходит к авторизации (см. Альтернативный поток А1).

3. После успешной регистрации или авторизации система предоставляет доступ к основному функционалу [6].

4. Пользователь выбирает одно из доступных действий: просмотр фотоальбома вокзалов или проверку наличия мест в поезде.

5. При выборе просмотра фотоальбома система отображает галерею изображений вокзалов, после чего пользователь возвращается к выбору дальнейших действий (см. Альтернативный поток А4).

6. При выборе проверки наличия мест пользователь переходит к бронированию билета: указывает дату, время и место, после чего система оформляет бронирование.

7. Если в дальнейшем потребуется отменить бронь, пользователь переходит в раздел просмотра забронированных билетов и активирует отмену бронирования (см. Альтернативный поток А3).

8. Завершив работу с системой, пользователь выбирает опцию «Выход из системы»

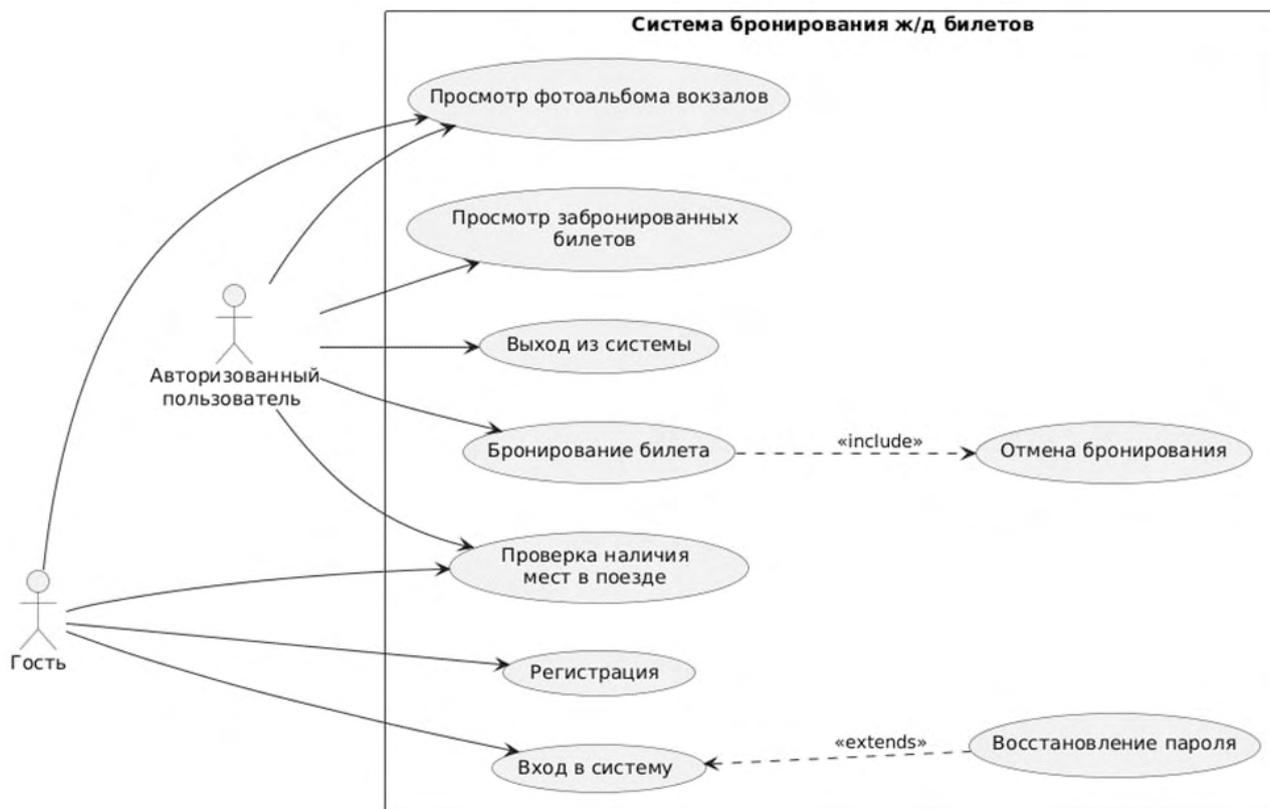


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования для информационной системы по бронированию ж/д билетов  
Примечание: составлено авторами.

(см. Альтернативный поток А5), после чего сеанс завершается.

Альтернативные сценарии:

1. А1 (Вход): Авторизация → восстановление пароля при ошибке (А2).
2. А2 (Восстановление пароля): Сброс пароля по e-mail/имени → возврат к А1.
3. А3 (Отмена брони): Выбор билета → подтверждение отмены.
4. А4 (Фотоальбом): Просмотр галереи → возврат в меню.
5. А5 (Выход): Завершение сеанса → стартовый экран.

Диаграмма классов (class diagram) – статическая диаграмма, являющаяся основным логическим представлением системы. Диаграмма классов позволяет понять структуру системы, определить классы объектов, их атрибуты и методы, а также взаимосвязи между классами (рис. 2). Это полезный инструмент для анализа, проектирования и документирования программных систем [7].

Сервис Аутентификации – отвечает за вход, регистрацию и сброс пароля. Методы возвращают или проверяют объекты типа «Пользователь».

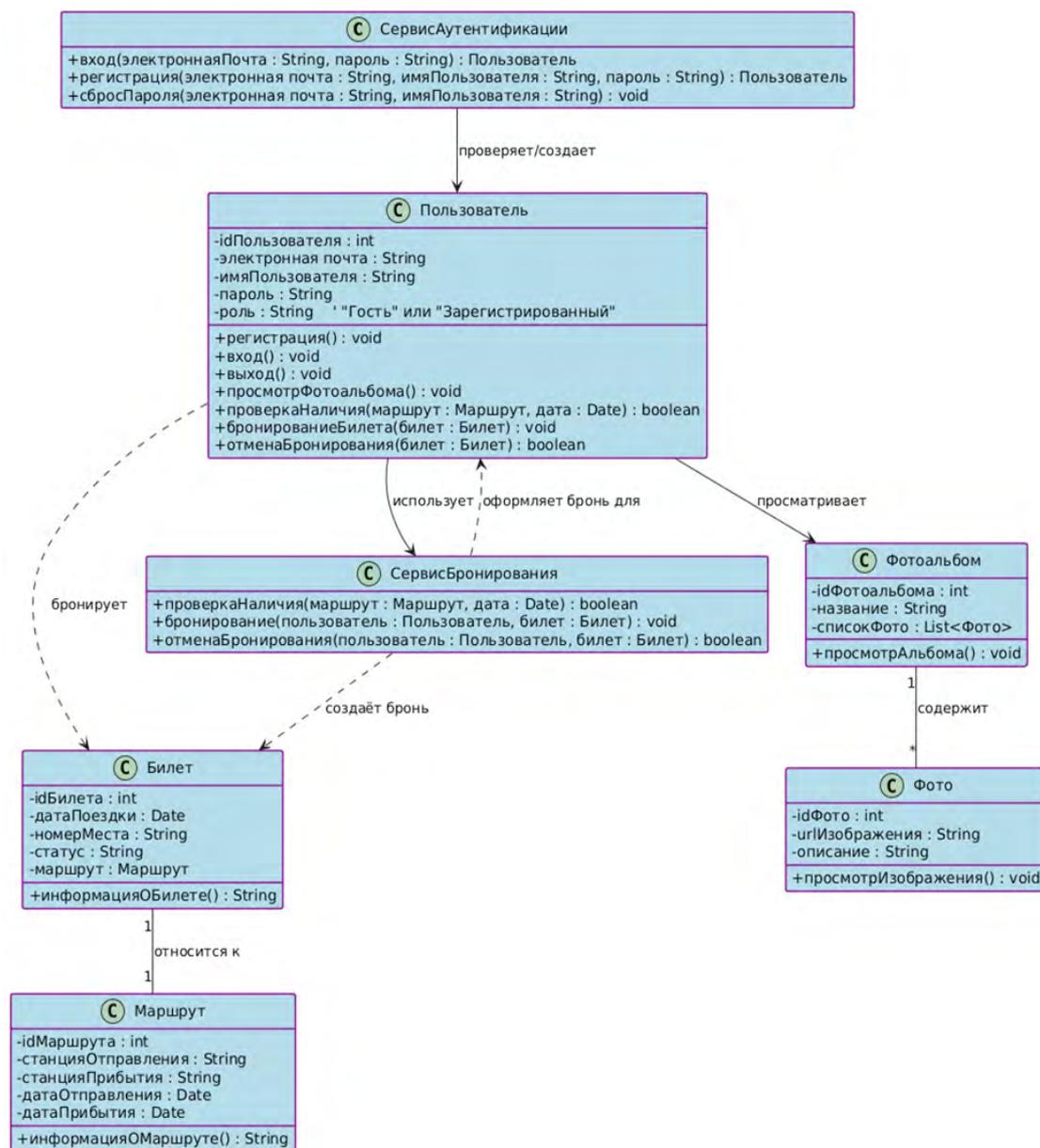


Рис. 2. Диаграмма классов для информационной системы по бронированию ж/д билетов  
 Примечание: составлено авторами.

Пользователь – представляет как Гостя, так и зарегистрированного пользователя. Помимо стандартных методов регистрации, входа и выхода, содержит методы для просмотра фотоальбома, проверки наличия мест, бронирования билета и отмены брони [8].

Билет – содержит информацию о поездке (дату, время, номер места, статус) и связан с конкретным маршрутом. Билет используется как бронь.

Маршрут – содержит сведения о маршруте (станции, время отправления/прибытия).

Сервис Бронирования – реализует логику проверки наличия мест, оформления брони и ее отмены. Методы работают с объектами «Пользователь» и «Билет».

Фотоальбом и Фото – отвечают за отображение галереи вокзалов.

Ассоциации отражают направленность связей:

1. Сервис аутентификации создает и проверяет Пользователя.

2. Пользователь использует Сервис бронирования для оформления брони, а также просматривает Фотоальбом.

3. Билет связан с Маршрутом, а Пользователь напрямую бронирует билет.

4. Сервис бронирования оформляет бронь для пользователя, создавая связь между Пользователем и Билетом.

5. Фотоальбом агрегирует объекты Фото.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приложение разработано на Java с использованием Swing. Архитектура основана на принципе разделения ответственности, что обеспечило модульность и упростило поддержку системы. Ключевые компоненты (рис. 3):

1. Навигация и состояние:

– MainFrame: Главный контейнер (управление панелями через CardLayout, хранение глобальных данных).

– TopPanel: Отображение информации о пользователе и кнопки выхода.

2. Основные функциональные модули:

– MainPanel: Стартовое меню (вход, регистрация, проверка мест, фотоальбом).

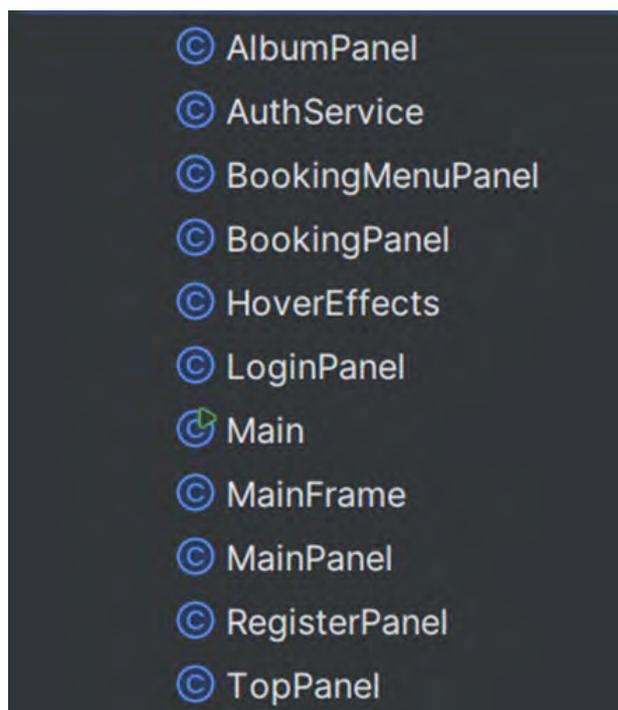


Рис. 3. Полученная структура классов графического пользовательского интерфейса

Примечание: составлено авторами.

– LoginPanel/RegisterPanel: Авторизация и регистрация с валидацией данных.

– BookingPanel: Бронирование билетов (выбор параметров, проверка мест, запись в файл).

– BookingMenuPanel: Управление бронированиями для авторизованных пользователей.

3. Вспомогательные сервисы:

– AlbumPanel: Просмотр фотоальбома вокзалов.

– AuthService: Логика работы с учетными данными (users.csv).

– HoverEffects: Стилизация интерфейса (эффекты наведения, скругленные контейнеры).

Главный класс MainFrame служит контейнером для всех панелей пользовательского интерфейса и реализует механизм навигации между ними посредством CardLayout. Он также хранит глобальное состояние (например, имя текущего пользователя) и обеспечивает корректное обновление верхней панели через вызов метода topPanel.updateProfile (). Особое внимание уделено обработке события нажатия клавиши ESC, чтобы в зависимости от состояния авторизации пользователь не мог вернуться к начальному экрану, если уже авторизован.

Модуль TopPanel отвечает за отображение верхней части интерфейса, включающей кнопку с иконкой аккаунта и приветственное сообщение. При обновлении профиля через метод updateProfile (String username) панель скрывает или отображает данные компоненты в зависимости от наличия имени пользователя. При выходе из аккаунта данные сбрасываются, что приводит к скрытию иконки и надписи (рис. 4).

MainPanel реализует стартовый экран приложения. Здесь расположены кнопки для перехода к авторизации, регистрации, проверки статуса поезда и просмотра фотоальбома.

Данный модуль предоставляет интуитивно понятный интерфейс для первичного взаимодействия пользователя с системой (рис. 5).

Панели LoginPanel и RegisterPanel обеспечивают сбор учетных данных пользователя для входа и регистрации соответственно. В LoginPanel реализована логика обращения к AuthService для проверки корректности введенных данных, а в RegisterPanel дополнительно производится валидация e-mail с использованием регулярного выражения. Оба модуля оповещают пользователя об успешном выполнении или ошибке посредством диалоговых окон (рис. 6, 7).



Рис. 4. Пример отображения верхней панели с элементами профиля  
Примечание: составлено авторами.

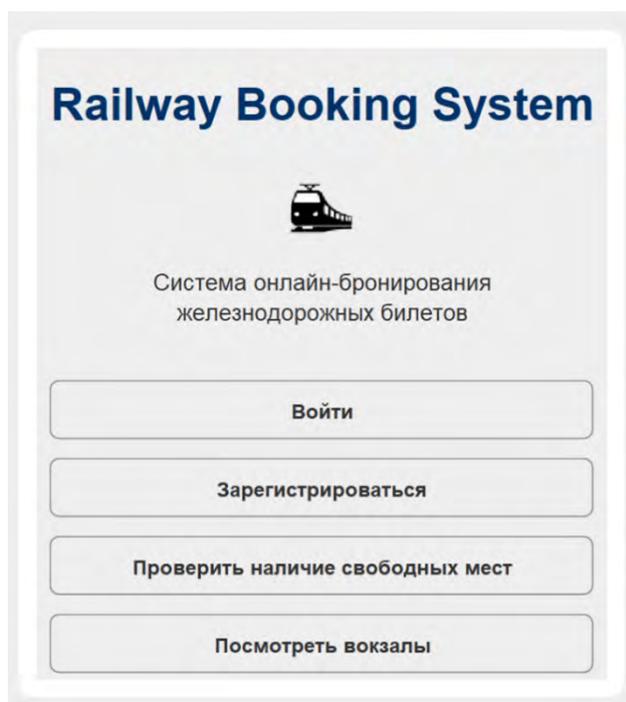


Рис. 5. Внешний вид главной панели приложения  
Примечание: составлено авторами.

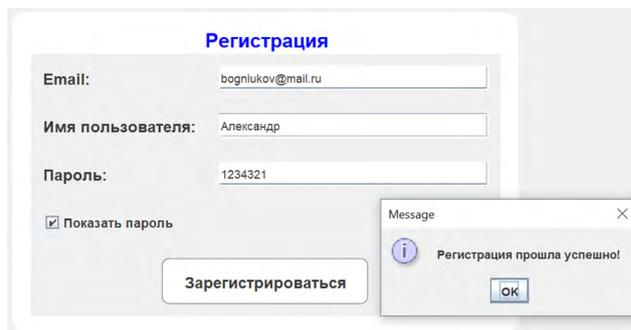


Рис. 6. Пример формы регистрации пользователя (RegisterPanel)  
Примечание: составлено авторами.

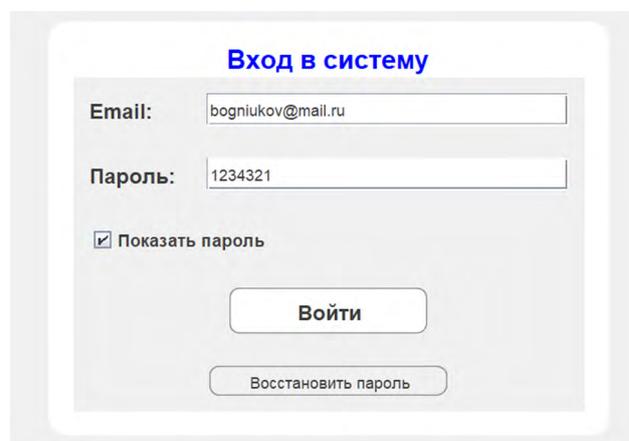


Рис. 7. Пример формы входа пользователя (LoginPanel)  
Примечание: составлено авторами.

BookingPanel предназначена для оформления брони. Здесь реализовано:

- выбор станций отправления и прибытия;
- выбор даты отправления и, при необходимости, даты возврата;
- выбор типа вагона и номера вагона;
- выбор места с динамическим обновлением доступных мест (на основе данных, считанных из файла bookings.txt);
- логика сохранения информации о брони в файл и оповещение пользователя о результате операции.

Кроме того, в BookingPanel реализована функция проверки статуса поезда, которая отображает количество забронированных билетов и оставшиеся свободные места (рис. 8, 9).

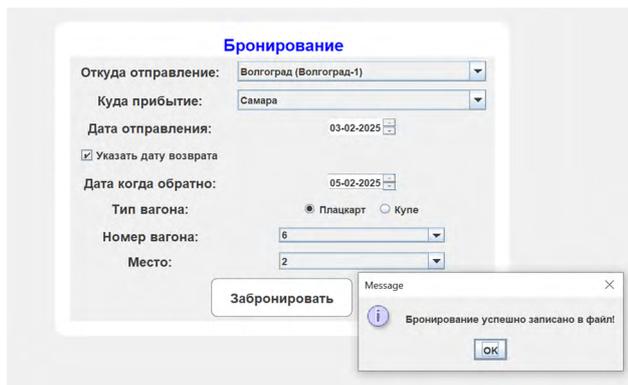


Рис. 8. Пример формы меню бронирования билетов

Примечание: составлено авторами.

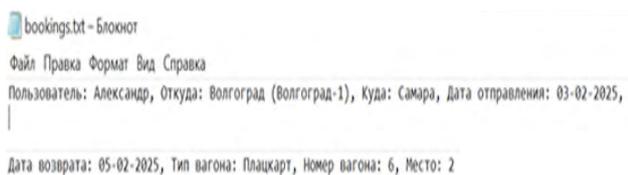


Рис. 9. Забронированный билет в файле bookings.txt

Примечание: составлено авторами.

Модуль BookingMenuPanel предназначен для предоставления дополнительных возможностей авторизованному пользователю. Здесь реализована функция просмотра забронированных билетов, которая считывает данные из файла и отображает их в виде таблицы с возможностью возврата брони.

Также с этой панели пользователь может перейти к оформлению новой брони, проверить статус поезда или просмотреть фотоальбом (рис. 10).

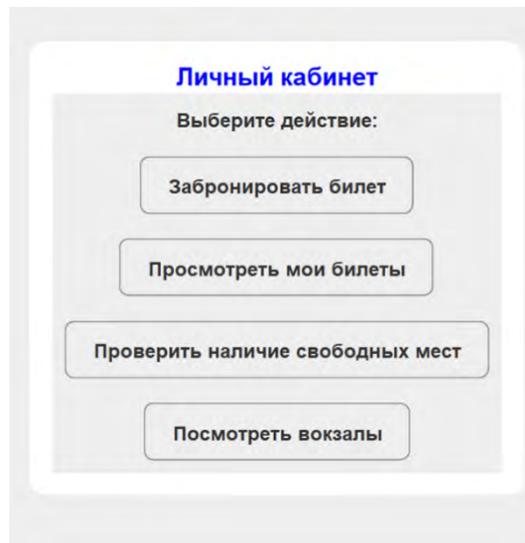


Рис. 10. Пример интерфейса панели меню бронирования

Примечание: составлено авторами.

AlbumPanel реализует функционал фотоальбома вокзалов. Модуль позволяет пользователю просматривать изображения вокзалов с поддержкой переключения с помощью кнопок (и клавиатурных стрелок). Для масштабирования изображений используется метод `scaleImageIcon()`, обеспечивающий плавное отображение фото в заданном разрешении (рис. 11).

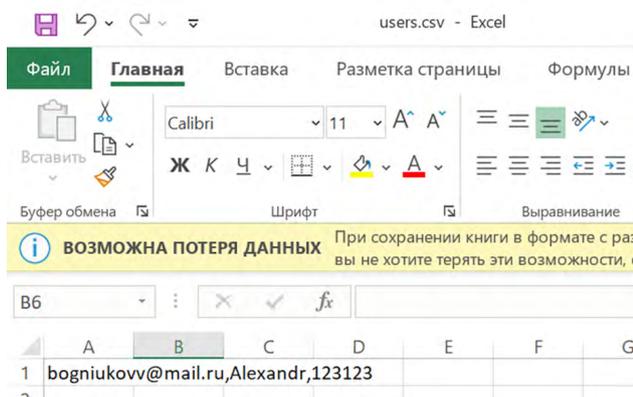


Рис. 11. Пример интерфейса фотоальбома

Примечание: составлено авторами.

AuthService представляет собой сервис для работы с учетными записями пользователей. Реализованные методы включают регистрацию, вход и сброс пароля, при этом

данные пользователей хранятся в файле users.csv. Логика проверки существования пользователя и корректности учетных данных реализована посредством чтения и записи в файл (рис. 12).



**Рис. 12. Запись данных пользователя в файле users.csv**

Примечание: составлено авторами.

Класс HoverEffects содержит утилитные методы для стилизации компонентов интерфейса, таких как добавление эффекта подчеркивания при наведении, создание кнопок с иконками, а также обертывание панелей в скругленные контейнеры для улучшения визуального восприятия (рис. 13).



**Рис. 13. Пример работы эффекта подчеркивания при наведении на иконку «Домой»**

Примечание: составлено авторами.

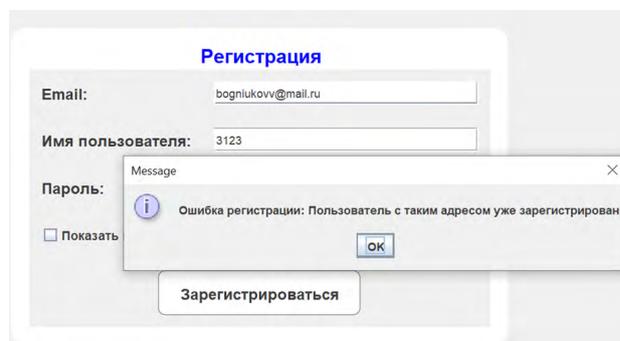
Интеграция модулей обеспечивается через класс MainFrame, который связывает все панели с помощью CardLayout. Каждый модуль взаимодействует с MainFrame для получения общего состояния (например, имени пользователя) и перехода между экранами. Сервисы AuthService и BookingService вызываются из соответствующих панелей, что позволяет

реализовать чистую архитектуру и модульное тестирование.

Для тестирования были разработаны следующие сценарии:

1. Авторизация и регистрация: проверка ввода корректных и некорректных данных, тестирование восстановления пароля.

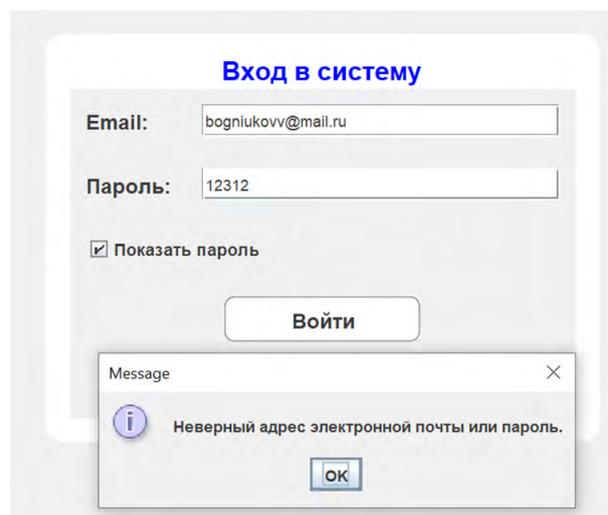
Проверим все возможности регистрации и авторизации. Если пользователь захочет зарегистрировать новый аккаунт, но этот адрес электронной почты уже есть в «базе данных», программа выдаст ошибку регистрации «Пользователь с таким адресом уже зарегистрирован» (рис. 14).



**Рис. 14. Попытка зарегистрировать второй аккаунт с одним адресом электронной почты**

Примечание: составлено авторами.

Если пользователь забыл пароль – ему покажется диалоговое окно «Неверный адрес электронной почты или пароль» (рис. 15).



**Рис. 15. Попытка авторизоваться с неверным паролем**

Примечание: составлено авторами.

Для восстановления пароля необходимо ввести e-mail и имя пользователя, указанные при регистрации (рис. 16).

Рис. 16. Меню ввода данных для восстановления пароля

Примечание: составлено авторами.

Если данные корректны, система предоставляет возможность сменить пароль (рис. 17).

Рис. 17. Меню сброса пароля

Примечание: составлено авторами.

2. Оформление брони: выбор станций, дат, типа вагона, номера вагона и места, проверка корректности обновления списка свободных мест.

Если пользователь бронирует билет, то в следующий раз это забронированное место пропадет из списка (рис. 18).

Рис. 18. Список доступных мест после бронирования

Примечание: составлено авторами.

Если пользователи бронируют все билеты на конкретный поезд, то появится надпись «Все билеты забронированы» (рис. 19).

Рис. 19. Сообщение «Все билеты забронированы»

Примечание: составлено авторами.

3. Просмотр бронирований: считывание данных брони из файла, корректное отображение в виде таблицы, а также проверка механизма возврата брони (рис. 20).

В результате реализации системы был достигнут высокоуровневый уровень модульности, что позволило разделить функциональность на логически независимые блоки. Каждый модуль отвечает за свою область ответственности: от управления навигацией до обработки учетных данных и оформления брони. Проведенное функциональное тестирование подтвердило корректность работы системы, стабильность ее функционирования и удобство использования конечным пользователем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты тестирования подтвердили корректность работы всех функциональных модулей. Были проверены сценарии регистрации, авторизации, оформления и отмены бронирования, а также взаимодействие с файлами данных. Приложение демонстрирует надежность и производительность, а его архитектура соответствует принципам модульности, что облегчает его поддержку и дальнейшее развитие.

Таким образом, поставленные задачи были успешно выполнены, а разработанное программное обеспечение может быть исполь-

Выбрать	Откуда	Куда	Дата отправления	Дата возврата	Тип вагона	Вагон	Место
<input checked="" type="checkbox"/>	Волгоград (Волгоград-1)	Самара	04-02-2025	Нет	Плацкарт	1	1
<input checked="" type="checkbox"/>	Волгоград (Волгоград-1)	Самара	04-02-2025	Нет	Плацкарт	1	2
<input checked="" type="checkbox"/>	Волгоград (Волгоград-1)	Самара	04-02-2025	Нет	Плацкарт	1	3
<input checked="" type="checkbox"/>	Волгоград (Волгоград-1)	Самара	04-02-2025	Нет	Плацкарт	1	4
<input checked="" type="checkbox"/>	Волгоград (Волгоград-1)	Самара	04-02-2025	Нет	Плацкарт	1	5
<input checked="" type="checkbox"/>	Волгоград (Волгоград-1)	Самара	04-02-2025	Нет	Плацкарт	1	6
<input checked="" type="checkbox"/>	Волгоград (Волгоград-1)	Самара	04-02-2025	Нет	Плацкарт	1	7
<input checked="" type="checkbox"/>	Волгоград (Волгоград-1)	Самара	04-02-2025	Нет	Плацкарт	1	8
<input checked="" type="checkbox"/>	Волгоград (Волгоград-1)	Самара	04-02-2025	Нет	Плацкарт	1	9
<input type="checkbox"/>	Волгоград (Волгоград-1)	Самара	04-02-2025	Нет	Плацкарт	1	10

Рис. 20. Проверка механизма отображения и возврата брони

Примечание: составлено авторами.

зовано как основа для дальнейшего расширения системы, в том числе путем интеграции с внешними сервисами и добавления допол-

нительных функций, таких как онлайн-оплата и динамическое обновление данных о расписании поездов.

### Список источников

1. Андреева Т. И. Частный железнодорожный транспорт Сибири : моногр. Барнаул : АлтГПУ, 2021. 276 с.
2. Коузен К. Современный Java: рецепты программирования. М. : ДМК Пресс, 2018. 275 с.
3. Москвитин А. А. Данные, информация, знания: методология, теория, технологии : моногр. 2-е изд., стер. СПб. : Лань, 2023. 236 с.
4. Lalović K. G., Bogdanoski M. Z. Java GUI application for comparing the levels of biometric security: Fingerprint vs. Iris // *Vojnotehnički glasnik*. 2021. Vol. 69, no. 3. P. 676–686. <https://doi.org/10.5937/vojtehg69-32007>.
5. Рамальо Л. Python – К вершинам мастерства. Лаконичное и эффективное программирование / пер. с англ. А. А. Слинкина. 2-е изд. М. : ДМК Пресс, 2022. 898 с.
6. Буч Г., Рамбо Д., Якобсон И. Язык UML. Руководство пользователя : руководство / пер. с англ. Н. Мухина. 2-е изд. М. : ДМК Пресс, 2006. 496 с.
7. Харрис Д. М., Харрис С. Л. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера / пер. с англ. Imagination Technologies. М. : ДМК Пресс, 2017. 792 с.
8. Бурмистров А. В. Программирование на языке JAVA. Методические указания к лабораторным работам : методические указания. Пенза : ПензГТУ, 2014. 150 с.

### References

1. Andreeva T. I. Chastnyy zheleznodorozhnyy transport Sibiri. Monograph. Barnaul: Altai State Pedagogical University; 2021. 276 p. (In Russ.).
2. Kousen K. Modern Java recipes: Simple solutions to difficult problems in Java 8 and 9. Moscow: DМК Press; 2018. 275 p. (In Russ.).
3. Moskvitin A. A. Dannye, informatsiya, znaniya: metodologiya, teoriya, tekhnologii. Monograph. 2nd rev. ed. St. Petersburg: Lan; 2023. 236 p. (In Russ.).
4. Lalović K. G., Bogdanoski M. Z. Java GUI application for comparing the levels of biometric security: Fingerprint vs. Iris. *Vojnotehnički glasnik*. 2021;69(3):676–686. <https://doi.org/10.5937/vojtehg69-32007>.
5. Ramalho L. Fluent Python: Clear, concise and effective programming. Slinkin A. A., trans. 2nd ed. Moscow: DМК Press; 2022. 898 p. (In Russ.).
6. Booch G., Rumbaugh D., Jacobson I. The unified modeling language user guide. Mukhin N., trans. 2nd ed. Moscow: DМК Press; 2006. 496 p. (In Russ.).
7. Harris D. M., Harris S. L. Digital design and computer architecture. Imagination Technologies, trans. Moscow: DМК Press; 2017. 792 p. (In Russ.).
8. Burmistrov A. V. Programirovaniya na yazyke JAVA. Metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam. Methodical instructions. Penza: Penza State Technological University; 2014. 150 p. (In Russ.).

**Информация об авторах**

**А. А. Богнюков** – студент;  
<https://orcid.org/0009-0007-4463-6050>,  
[bogniukovv@gmail.com](mailto:bogniukovv@gmail.com)✉

**Д. Ю. Зорькин** – преподаватель;  
<https://orcid.org/0009-0002-3875-9285>,  
[mosh285@gmail.com](mailto:mosh285@gmail.com)

**Л. В. Самофалова** – старший преподаватель;  
<https://orcid.org/0000-0003-4694-2645>,  
[samof13@mail.ru](mailto:samof13@mail.ru)

**About the authors**

**A. A. Bognyukov** – Student;  
<https://orcid.org/0009-0007-4463-6050>,  
[bogniukovv@gmail.com](mailto:bogniukovv@gmail.com)✉

**D. Yu. Zorkin** – Lecturer;  
<https://orcid.org/0009-0002-3875-9285>,  
[mosh285@gmail.com](mailto:mosh285@gmail.com)

**L. V. Samofalova** – Senior Lecturer;  
<https://orcid.org/0000-0003-4694-2645>,  
[samof13@mail.ru](mailto:samof13@mail.ru)

Научная статья

УДК 621.391 + 621.396.96

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-2>

## Система сигналов на основе кодов Задова – Чу. Часть 1. Автокорреляционные свойства

*Анатолий Ильич Дёмко**Сургутский государственный университет, Сургут, Россия*

**Аннотация.** Использование в радиолокации и электрической связи сложных сигналов ограничивается достаточностью исследования их корреляционных свойств, что определяет актуальность исследования и оптимизации сигналов. Показано, что максимальное число вариантов имеет система сигналов, состоящая из простого числа элементов в последовательности. Приведены результаты расчета уровня боковых лепестков автокорреляционной функции такой системы сигналов. Во второй части статьи исследованы взаимнокорреляционные свойства системы сигналов на основе кодов Задова – Чу. Полученные результаты могут быть использованы в электрической связи и радиолокации.

**Ключевые слова:** система сигналов, код Задова – Чу, взаимно простые числа, автокорреляционная функция, уровень боковых лепестков

**Для цитирования:** Дёмко А. И. Система сигналов на основе кодов Задова – Чу. Часть 1. Автокорреляционные свойства // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 3. С. 17–25. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-2>.

Original article

## Signal system based on Zadoff–Chu sequence. Part 1. Autocorrelation properties

*Anatoly I. Dyomko**Surgut State University, Surgut, Russia*

**Abstract.** The use of complex signals in radiolocation and electrical communications is limited by the existing research on correlation properties, which defines the relevance of signals' optimization. The paper reveals that the signal system with maximum variants consists of prime integers of elements in sequence. Calculation of the autocorrelation properties sidelobe level in the signal system is presented. In addition, the paper examines the cross-correlation properties of a signal system based on Zadoff–Chu sequence. The results are applicable to radiolocation and electrical communications.

**Keywords:** signal system, Zadoff–Chu sequence, coprime integers, autocorrelation function, sidelobe level

**For citation:** Dyomko A. I. Signal system based on Zadoff–Chu sequence. Part 1. Autocorrelation properties. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(3):17–25. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-2>.

### ВВЕДЕНИЕ

Многофазная дискретная модуляция имеет множество вариантов реализации, часть из которых обладает примечательными корреляционными свойствами, в частности нулевым уровнем боковых лепестков (УБЛ) периодической автокорреляционной функции (АКФ) [1–4]. Для практических задач

во многих случаях более важна импульсная (непериодическая, одиночная) автокорреляционная функция, но сигналы с нулевым УБЛ автокорреляционной функции не известны. Однако некоторые сигналы с нулевым УБЛ периодической АКФ имеют достаточно низкий УБЛ и для импульсной АКФ. В связи с этим актуальными являются исследования

непериодических корреляционных свойств систем сигналов, имеющих низкий УБЛ и реализуемые с высокой точностью схемы формирования. Целью статьи является исследование корреляционных свойств системы сигналов на основе кодов Задова – Чу, имеющих нулевой уровень боковых лепестков периодической автокорреляционной функции и низкий уровень боковых лепестков автокорреляционной функции.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Аппроксимация квадратичного закона изменения фазы сигнала с линейной частотной модуляцией [5–7] приводит к сигналам на основе кода Чу [8], которые являются многофазными квадратичными последовательностями (МФКП) – последовательностями, в которых начальная фаза изменяется по квадратичному закону порядкового номера элемента.

Фаза  $n$ -го радиоимпульса МФКП определяется выражением (1)

$$\varphi_n = \begin{cases} \frac{\pi}{N} n^2, & N - \text{четное} \\ \frac{2\pi}{N} n^2, & N - \text{нечетное} \end{cases} \quad (1)$$

$$n = 0, \dots, N - 1,$$

где  $N$  – число элементов в последовательности;

$n$  – порядковый номер элемента, начиная с нулевого.

Сигналы на основе МФКП ортогональны относительно своих циклически сдвинутых версий и имеют нулевой УБЛ периодической АКФ при небольшом уровне боковых лепестков АКФ. В статье рассмотрены корреляционные свойства одиночных (непериодических) МФКП.

На рис. 1 представлена АКФ МФКП из 64 элементов в последовательности.

АКФ МФКП имеет ось симметрии при нулевом нормированном сдвиге и дополнительные оси симметрии при сдвигах  $\pm 0,5N$ . Максимальные боковые лепестки АКФ МФКП расположены симметрично на расстоянии  $\pm 0,75\sqrt{N}$  от главного максимума. Уровень боковых лепестков автокорреляционной функции МФКП монотонно уменьшается примерно на 5 дБ/окт при увеличении расстояния от главного максимума вплоть до  $N/4$ , далее до  $N/2$  он уменьшается примерно на 3 дБ [9, 10].

На рис. 2 представлена зависимость УБЛ МФКП (в дБ) от числа элементов в последовательности.

Уровень максимального бокового лепестка автокорреляционной функции МФКП не зависит от несущей частоты, длительности и периода следования радиоимпульсов, а определяется только числом элементов в по-

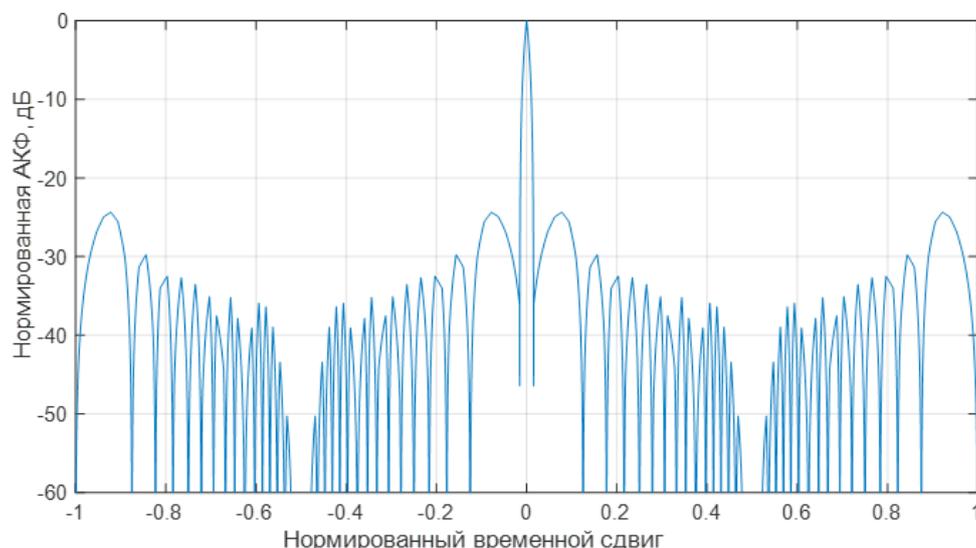


Рис. 1. Автокорреляционная функция МФКП для  $N = 64$

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

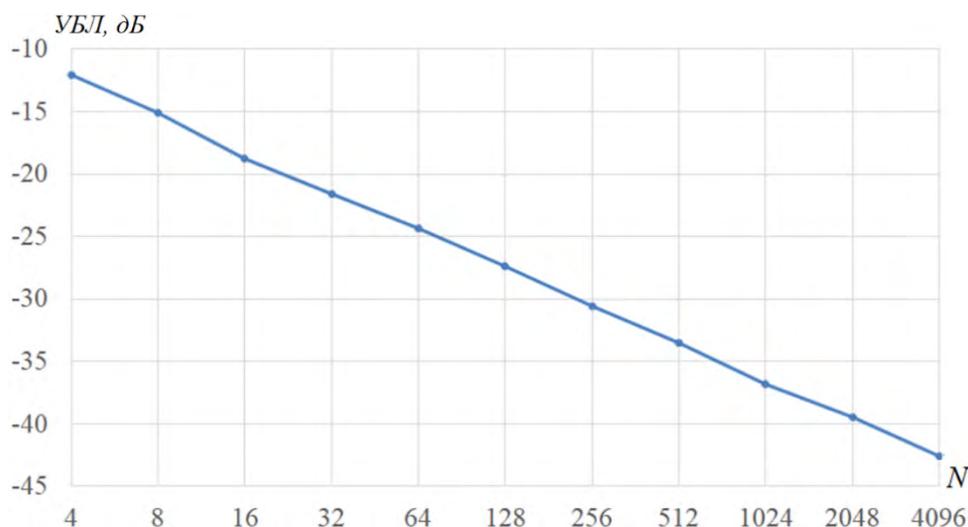


Рис. 2. Зависимость УБЛ автокорреляционной функции МФКП от N

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

следовательности, уменьшаясь (2) на 6 дБ/окт при увеличении N:

$$M_{\max} = -12 - 3[\log_2 N - 2], \text{ дБ.} \quad (2)$$

Несущая частота влияет лишь на тонкую структуру сигнала (положение спектра на оси частот), длительность радиоимпульсов влияет на ширину главного максимума АКФ, период следования определяет наличие и величину нулевых промежутков между боковыми лепестками, распределение и величина которых определяется исключительно начальными фазами радиоимпульсов. Известны многофазные (3) последовательности (коды) Задова – Чу [11]:

$$\varphi_n = \begin{cases} \frac{\pi}{N} n^2 \cdot q, & N - \text{четное} \\ \frac{\pi}{N} \cdot q \cdot n(n+1), & N - \text{нечетное} \end{cases} \quad (3)$$

$$n = 0, \dots, N - 1,$$

где q – целое число, взаимно простое с N.

Примечательность сигналов на основе кодов Задова – Чу состоит в большом объеме различных вариантов [12, 13]: для данного числа элементов в последовательности N существует N<sub>1</sub> вариантов реализации, определяемых количеством взаимно простых с N чисел q. Следовательно для любого числа элементов в последовательности N существует система из N<sub>1</sub> сигналов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице в качестве примера представлено количество N<sub>1</sub> взаимно простых чисел для последовательностей длиной от 5 до 55 элементов.

Для практического использования системы сигналов на основе кодов Задова – Чу требуется поиск таких последовательностей, для которых, с одной стороны, число вариантов

Таблица

Количество взаимно простых чисел

N	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
N <sub>1</sub>	4	2	6	4	6	4	10	4	12	6	8	8	16	6	18	8	12
N	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
N <sub>1</sub>	10	22	8	20	12	18	12	28	8	30	16	20	16	24	12	36	18
N	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
N <sub>1</sub>	24	16	40	12	42	20	24	22	46	16	42	20	32	24	52	18	40

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

$N_1$  реализации будет максимально большим, с другой стороны, корреляционные свойства максимального их числа будут хорошими (максимальный УБЛ АКФ будет больше требуемого порогового значения).

Максимальное количество взаимно простых чисел  $N_1$  получается для последовательностей, состоящих из простого числа элементов (5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 53, и т. д.):

$$N_1 = N - 1.$$

Для четного числа элементов число взаимно простых чисел в среднем небольшое ( $N_1 \approx 0,5N$ ), для нечетного – больше ( $0,5N \leq N_1 \leq 0,86N$ ).

Корреляционные свойства сигналов на основе кодов Задова – Чу для разных значений параметра  $q$ , который определяет скорость изменения фазы (3), изучены еще в недостаточной степени.

На рис. 3 представлены законы изменения фазы сигналов на основе кодов Задова – Чу из 32 элементов для трех значений параметра  $q$  (1, 3, 5), а на рис. 4 – эти же зависимости, приведенные к интервалу  $0/360$  с учетом периодичности гармонических функций.

Если при разных значениях параметра  $q$  качественные отличия исходных законов изменения фазы (3) сигналов на основе кодов

Задова – Чу (рис. 3) относительно незначительны, то после преобразования фазы (4) к интервалу  $0/360$  (рис. 4) эти отличия становятся существенными, причем при увеличении числа элементов  $N$  в последовательности отличия нарастают.

$$\varphi_n = \begin{cases} \frac{\pi n^2 q}{N} - 2\pi \cdot E \left[ \frac{\pi n^2 q}{N} \cdot \frac{1}{2\pi} \right], & N - \text{четное} \\ \frac{\pi n(n+1)q}{N} - 2\pi \cdot E \left[ \frac{\pi n(n+1)q}{N} \cdot \frac{1}{2\pi} \right], & N - \text{нечетное} \end{cases} \quad (4)$$

где  $E[x]$  – целая часть числа  $x$ .

В процессе моделирования установлено, что для различных значений параметра  $q$  кода Задова – Чу существенно изменяется структура АКФ, совпадая при двух значениях параметра ( $q = 1$  и  $q = N - 1$ ) с АКФ кода Чу.

На рис. 5 представлена зависимость УБЛ АКФ сигналов на основе кодов Задова – Чу из 32 элементов от параметра  $q$ . Как видно, взаимно простой с  $N = 32$  параметр  $q$  принимает в данном случае исключительно нечетные значения.

В среднем УБЛ АКФ для разных значений параметра  $q$  имеет значительный разброс, принимая минимальные значения для крайних значений взаимно простых чисел ( $q = 1$  и  $q = -1$ ). По результатам моделирования установлено, что для любого числа элементов

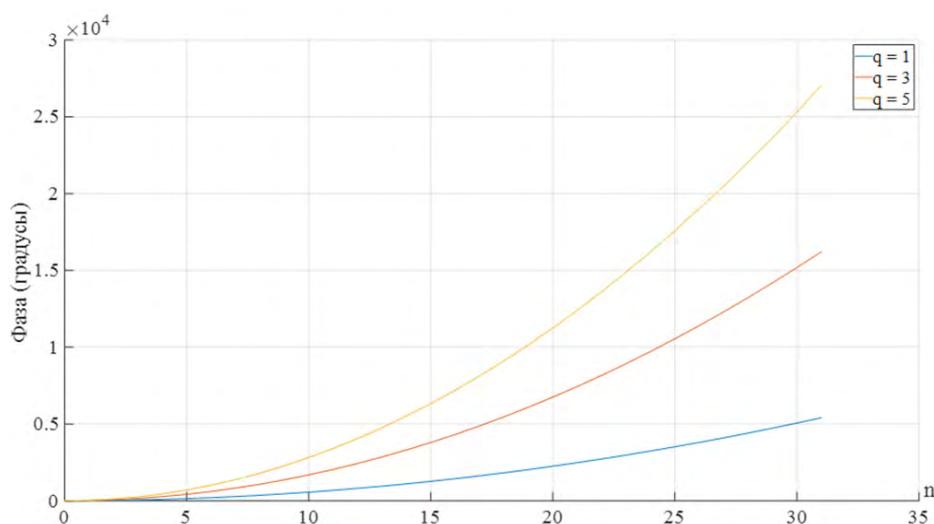
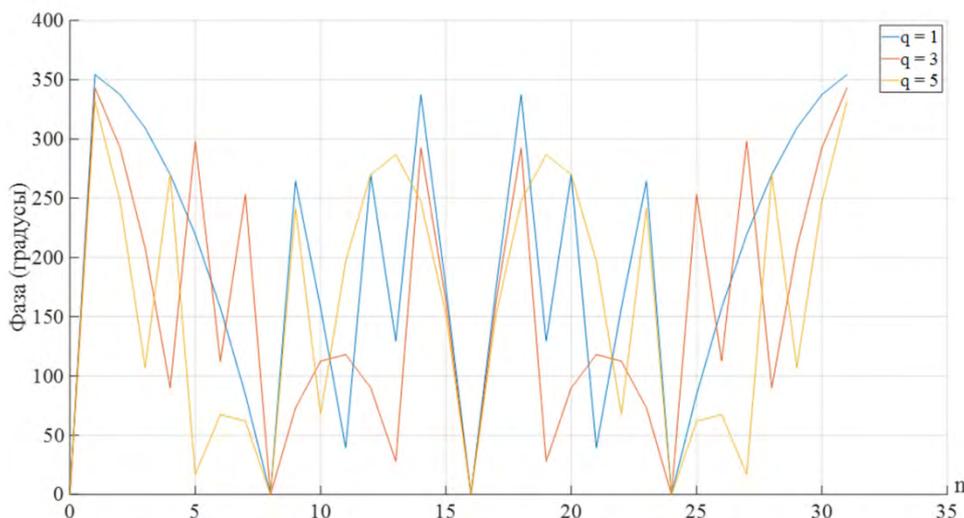


Рис. 3. Зависимость фазы сигнала на основе кода Задова – Чу от порядкового номера элемента последовательности  $n$  ( $N = 32$ )

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.



**Рис. 4. Зависимость преобразованной фазы сигнала на основе кода Задова – Чу от порядкового номера элемента последовательности  $n$  ( $N = 32$ )**

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

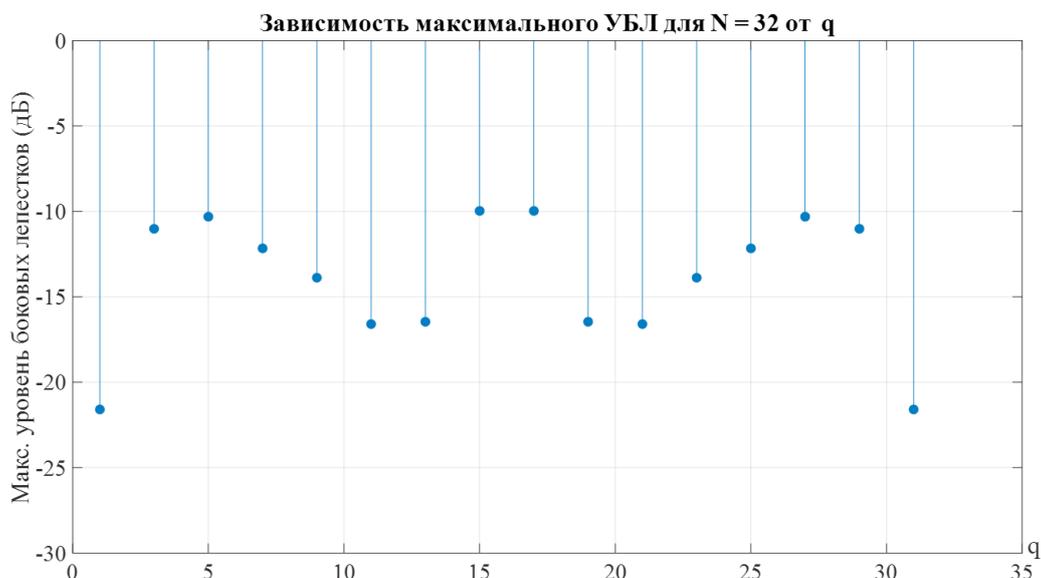
в последовательности имеются значения параметра  $q$ , при которых УБЛ достаточно высокий (около  $-10$  дБ).

На рис. 6 представлена зависимость УБЛ сигналов на основе кодов Задова – Чу в зависимости от параметра  $q$  для последовательностей длиной от 5 до 16 элементов.

Анализ приведенных зависимостей демонстрирует нерегулярность структуры (отсутствие некоторых точек означает, что для данного числа элементов последовательности  $N$  текущее число  $q$  не является

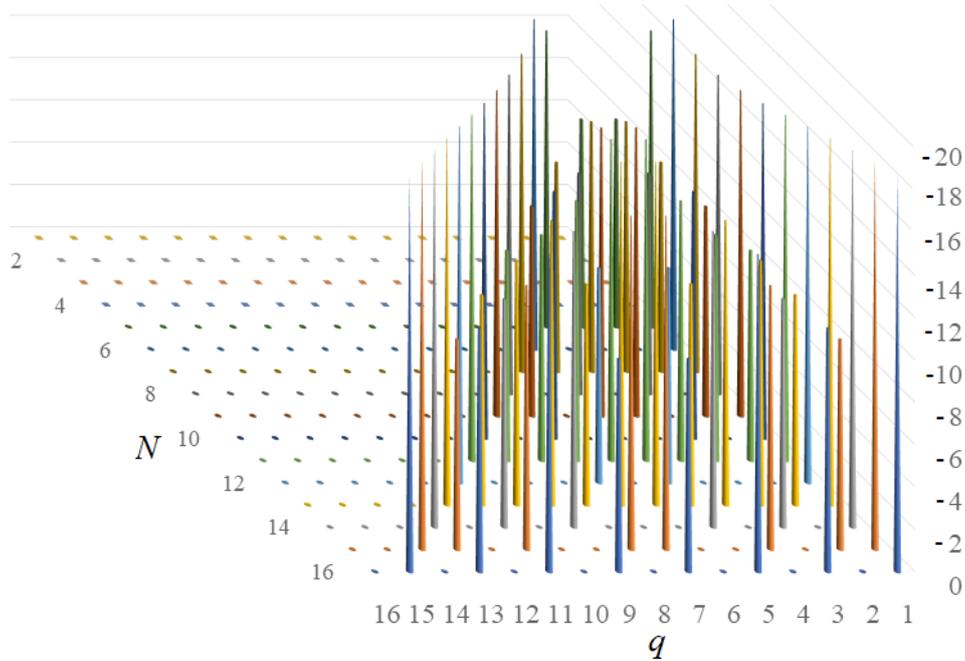
с ним взаимно простым). Для крайних значений ( $q = 1$  и  $q = N - 1$ ) УБЛ принимает значения, аналогичные сигналам на основе кода Чу.

На рис. 7 представлены зависимости числа взаимно простых с  $N$  числа элементов (синяя), числа функций с УБЛ АКФ больше  $-15$  дБ (оранжевая), числа функций с УБЛ АКФ больше  $-18$  дБ (серая), числа функций с УБЛ АКФ больше  $-21$  дБ (желтая) в интервале от 210 до 260 элементов последовательности.



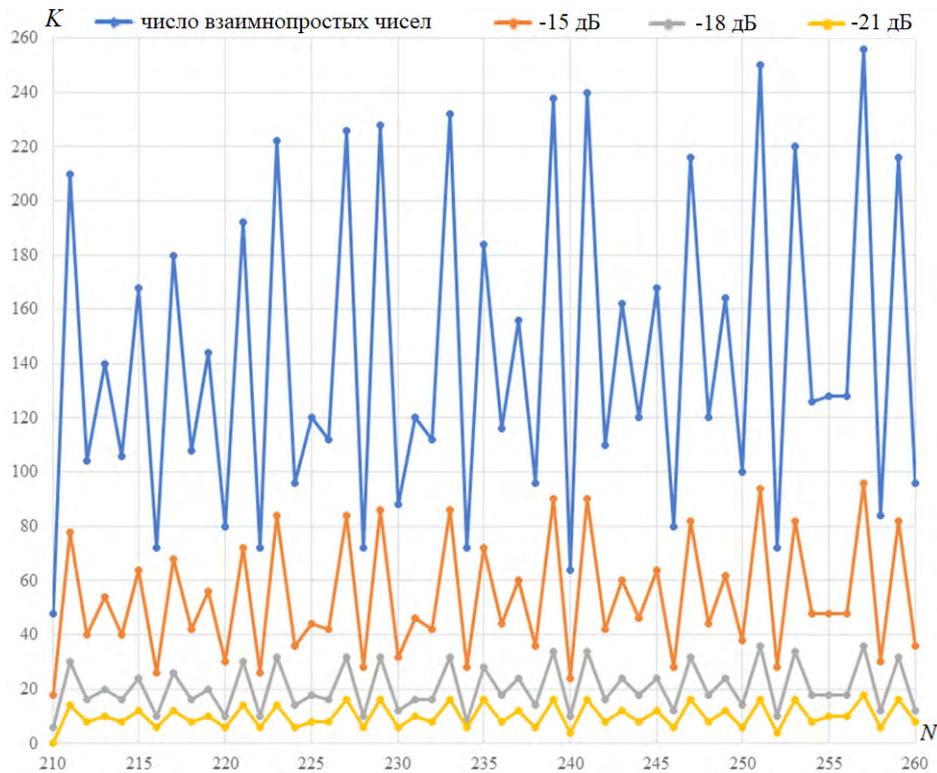
**Рис. 5. Зависимость УБЛ АКФ сигнала на основе кода Задова – Чу из 32 элементов от параметра  $q$**

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.



**Рис. 6. Зависимость УБЛ АКФ сигнала на основе кода Задова – Чу от параметра  $q$  для разного числа элементов в последовательности**

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.



**Рис. 7. Зависимости числа  $K$  взаимно простых с  $N$  числа элементов (синяя), числа функций с УБЛ АКФ больше  $-15$  дБ (оранжевая), числа функций с УБЛ АКФ больше  $-18$  дБ (серая), числа функций с УБЛ АКФ больше  $-21$  дБ (желтая) в интервале от 210 до 260 элементов последовательности**

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Наилучшие результаты (наибольшее число функций с минимальным уровнем боковых лепестков автокорреляционной функции) получаются, когда число элементов в последовательности  $N$  является простым числом, средние результаты соответствуют нечетному числу элементов в последовательности и максимальный УБЛ получается при четном числе элементов в последовательности.

На рис. 8 представлены аналогичные рис. 7 зависимости нормированные относительно  $N$  в интервале от 7 до 4 093 для простого числа элементов в последовательности.

При сравнении рис. 8 с рис. 2, который соответствует предельным параметрам кода Задова – Чу, следует, что УБЛ АКФ системы сигналов на основе кода Задова – Чу ранжируется по желаемым пороговым значениям: например, около  $0,37N_1$  сигналов имеют УБЛ АКФ не больше  $-15$  дБ; около  $0,14N_1$  сигналов имеют УБЛ АКФ не больше  $-18$  дБ и лишь около  $0,07N_1$  сигналов имеют УБЛ АКФ не больше  $-21$  дБ, хотя предельные значения УБЛ АКФ для отдельных сигналов из таких систем могут достигать  $-43$  дБ.

Приведенные зависимости УБЛ АКФ и корреляционных свойств дают информацию для выбора параметров сигналов из си-

стемы сигналов на основе кодов Задова – Чу в качестве системы сигналов либо для выбора определенных вариантов реализации при ограничении на конкретное число элементов в последовательности  $N$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сложные системы многофазных радиопульсных сигналов на основе кодов Задова – Чу обладают идеальными периодическими автокорреляционными свойствами (нулевой УБЛ периодической АКФ) и реализуемыми схемами формирования.

2. Максимальный объем  $N_1 = N - 1$  имеют системы сигналов на основе кодов Задова – Чу, состоящие из простого числа элементов  $N$ , меньший объем (в интервале от  $0,5N$  до  $0,86N$ ) для нечетного (не являющегося простым) числа элементов, еще меньше (около  $0,5N$ ) – для четного числа элементов.

3. Для любого числа элементов  $N$  минимальное значения максимального  $M_{max}$  бокового лепестка имеют сигналы с двумя значениями взаимно простого с  $N$  параметра  $q$  ( $q = 1$  и  $q = N - 1$ ):

$$M_{max} = -12 - 3[\log_2 N - 2], \text{ дБ.}$$

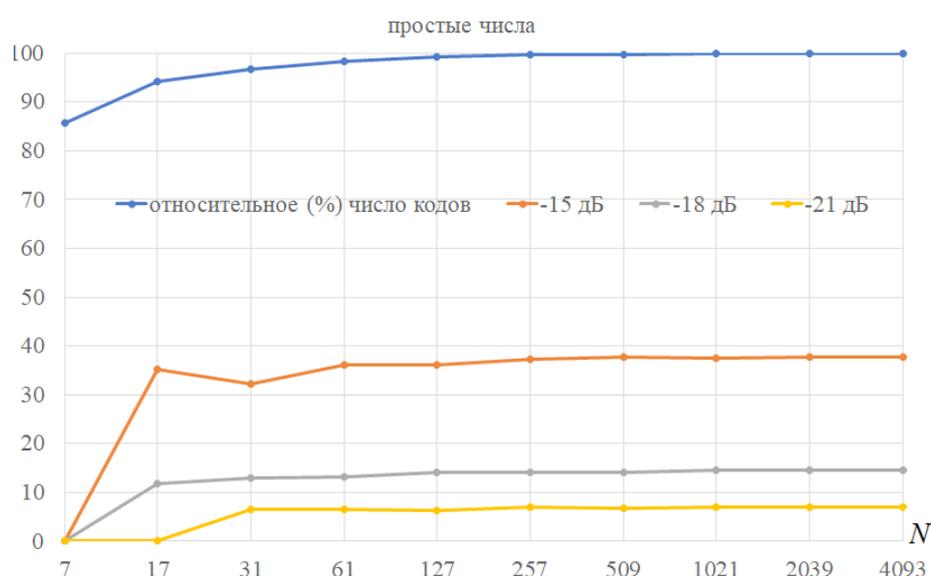


Рис. 8. Зависимости относительного (%) числа взаимно простых с  $N$  элементов (синяя), относительного числа функций с УБЛ АКФ больше  $-15$  дБ (оранжевая), относительного числа функций с УБЛ АКФ больше  $-18$  дБ (серая), относительного числа функций с УБЛ АКФ больше  $-21$  дБ (желтая) в интервале от 7 до 4 093 элементов последовательности

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Для таких сигналов уровень боковых лепестков автокорреляционной функции монотонно уменьшается примерно на 5 дБ/окт при увеличении расстояния от главного максимума вплоть до  $N/4$ , далее до  $N/2$  он уменьшается примерно на 3 дБ.

4. Уровень максимального бокового лепестка  $M_{max}$  автокорреляционной функции (при  $q = 1$  и  $q = N - 1$ ) не зависит от несущей частоты, длительности и периода следования радиоимпульсов, а определяется только числом элементов в последовательности, уменьшаясь на 6 дБ/окт при увеличении  $N$ .

5. Для любого числа элементов  $N$  имеются сигналы (при определенных значениях параметра  $q$ ) с относительно большим уровнем боковых лепестков (–10 дБ).

6. При большом числе элементов в последовательности ( $N > 31$ ) около  $0,37N_1$  сигналов системы сигналов имеют максимальное значение уровня боковых лепестков –15 дБ, около  $0,14N_1$  сигналов имеют максимальное значение уровня боковых лепестков –18 дБ и около  $0,07N_1$  сигналов имеют максимальное значение уровня боковых лепестков –21 дБ.

### Список источников

1. Вакман Д. Е. Сложные сигналы и принцип неопределенности в радиолокации. М. : Сов. радио, 1965. 304 с.
2. Вакман Д. Е., Седлецкий Р. М. Вопросы синтеза радиолокационных сигналов. М. : Сов. радио, 1973. 312 с.
3. Фрэнк Р. Л. Многофазные коды с хорошими непериодическими корреляционными свойствами // Зарубежная радиоэлектроника. 1963. Т. 17, № 12. С. 39–44.
4. Ипатов В. П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М. : Радио и связь, 1992. 152 с.
5. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. Теория и применение / пер. с англ. под ред. В. С. Кельзона. М. : Сов. радио, 1971. 568 с.
6. Комаров И. В., Смольский С. М. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний. М. : Горячая линия – Телеком, 2015. 392 с.
7. Варакин Л. Е. Теория систем сигналов. М. : Сов. радио, 1978. 304 с.
8. Chu D. Polyphase codes with good periodic correlation properties // IEEE Transactions on Information Theory. Vol. 18, no. 4. P. 531–532. <https://doi.org/10.1109/TIT.1972.1054840>.
9. Zhou Z., Hellesteth T., Paramalli U. A family of polyphase sequences with asymptotically optimal correlation // IEEE Transactions on Information Theory. 2018. Vol. 64, no. 4. P. 2896–2900. <http://dx.doi.org/10.1109/TIT.2018.2796597>.
10. Дёмко А. И., Семенов О. Ю. Формирование многофазных сигналов с квантованием фазы // Вестник кибернетики. 2022. № 2. С. 39–45. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-2-39-45>.
11. Русанов В. Э. Исследование свойств автокорреляционной функции одного периода последовательности Задова – Чу // Экономика и качество систем связи. 2024. № 1. С. 53–59.

### References

1. Vakman D. E. Slozhnye signaly i printsip neopredelenosti v radiolokatsii. Moscow: Sov. radio; 1965. 304 p. (In Russ.).
2. Vakman D. E., Sedletsky R. M. Voprosy sinteza radiolokatsionnykh signalov. Moscow: Sov. radio; 1973. 312 p. (In Russ.).
3. Frank R. L. Mnogofaznye kody s khoroshimi nepriodicheskimi korrelyatsionnymi svoystvami. *Zarubezhnaya radioelektronika*. 1963;17(12):39–44. (In Russ.).
4. Ipatov V. P. Periodicheskie diskretnye signaly s optimalnymi korrelyatsionnymi svoystvami. Moscow: Radio i svyaz; 1992. 152 p. (In Russ.).
5. Cook Ch., Bernfeld M. Radar signals: An introduction to theory and application. Kelzon V. S., trans., ed. Moscow: Sov. radio; 1971. 568 p. (In Russ.).
6. Komarov I. V., Smolsky S. M. Osnovy teorii radiolokatsionnykh sistem s nepreryvnym izlucheniem chastotno-modulirovannykh kolebaniy. Moscow: Goryachaya liniya – Telecom; 2015. 392 p. (In Russ.).
7. Varakin L. E. Teoriya sistem signalov. Moscow: Sov. radio; 1978. 304 p. (In Russ.).
8. Chu D. Polyphase codes with good periodic correlation properties. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1972;18(4):531–532. <https://doi.org/10.1109/TIT.1972.1054840>.
9. Zhou Z., Hellesteth T., Paramalli U. A family of polyphase sequences with asymptotically optimal correlation. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2018;64(4):2896–2900. <http://dx.doi.org/10.1109/TIT.2018.2796597>.
10. Dyomko A. I., Semenov O. Yu. Generating multiphase signals with phase quantization. *Proceedings in Cybernetics*. 2022;(2):39–45. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-2-39-45>. (In Russ.).
11. Rusanov V. E. Research of the properties of the autocorrelation function of one period of the Zadov–Chu sequence. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*. 2024;(1):53–59. (In Russ.).

12. Степутин А. Н., Николаев А. Д. Последовательности Задова–Чу (ZC последовательности). URL: <https://1234g.ru/book/ZC.pdf> (дата обращения: 10.04.2025).
13. Киселева Т. П. Исследование свойств циклической автокорреляционной функции последовательности Задова – Чу в зависимости от характеристик квантования элементов последовательности // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 4. С. 40–44.
12. Steputin A. N., Nikolaev A. D. Posledovatelnosti Zadova–Chu (ZC posledovatelnosti). URL: <https://1234g.ru/book/ZC.pdf> (accessed: 10.04.2025). (In Russ.).
13. Kiseleva T. P. Investigation of properties of cyclic autocorrelation function of the sequence depending on the characteristics of quantization of the sequence elements. *Digital Signal Processing*. 2018;(4):40–44. (In Russ.).

### Информация об авторе

**А. И. Дёмко** – кандидат технических наук, доцент, почетный работник высшего образования РФ;

<https://orcid.org/0000-0003-0747-0294>,  
dai321@mail.ru

### About the author

**A. I. Dyomko** – Candidate of Sciences (Engineering), Docent, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation;

<https://orcid.org/0000-0003-0747-0294>,  
dai321@mail.ru

Научная статья  
УДК 621.391 + 621.396.96  
<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-3>



## Система сигналов на основе кодов Задова – Чу. Часть 2. Взаимнокорреляционные свойства

*Анатолий Ильич Дёмко*

*Сургутский государственный университет, Сургут, Россия*

**Аннотация.** Системы сигналов достаточно подробно описаны в литературе, однако их изучение является по-прежнему актуальной задачей. Показано, что максимальное число вариантов имеет система сигналов, состоящая из простого числа элементов в последовательности. Приведены результаты расчета уровня боковых лепестков взаимнокорреляционных функций такой системы сигналов. В первой части статьи исследованы автокорреляционные свойства сигналов из системы сигналов на основе кодов Задова – Чу. Полученные результаты могут быть использованы в электрической связи.

**Ключевые слова:** система сигналов, код Задова – Чу, взаимно простые числа, взаимнокорреляционная функция, уровень боковых лепестков

**Для цитирования:** Дёмко А. И. Система сигналов на основе кодов Задова – Чу. Часть 2. Взаимнокорреляционные свойства // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 3. С. 26–33. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-3>.

Original article

## Signal system based on Zadoff–Chu sequence. Part 2. Cross-correlation properties

*Anatoly I. Dyomko*

*Surgut State University, Surgut, Russia*

**Abstract.** Despite the detailed descriptions in the literature, the study of signal systems remains relevant. The paper reveals that the signal system with maximum variants consists of prime integers of elements in sequence. Calculation of the cross-correlation properties sidelobe level in the signal system is presented. In the first part of the paper, the autocorrelation properties of signals from a signal system based on Zadoff–Chu sequence are examined. Results can be used for electrical communication.

**Keywords:** signal system, Zadoff–Chu sequence, coprime integers, cross-correlation function, sidelobe level

**For citation:** Dyomko A. I. Signal system based on Zadoff–Chu sequence. Part 2. Cross-correlation properties. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(3):26–33. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-3>.

### ВВЕДЕНИЕ

Система сигналов принципиально отличается от набора разнотипных сигналов, поскольку объединяет совокупность сигналов с определенной общностью параметров, но в то же время проявляющих ярко выраженные отличные свойства. Преимущества использования системы сигналов по сравнению

с сигналами разного типа состоит в определенных предсказуемых перекрестных корреляционных связях, определяемых взаимнокорреляционными функциями (ВКФ). В связи с этим актуальными являются исследования по поиску системы сигналов с максимальным числом составляющих и хорошими свойствами перекрестной корреляции.

Для многоканальных систем электрической связи предпочтительными являются сигналы с минимальным уровнем ВКФ. Целью статьи является исследование взаимнокорреляционных свойств системы сигналов на основе кодов Задова – Чу, имеющих нулевой уровень боковых лепестков периодической автокорреляционной функции и низкий уровень боковых лепестков автокорреляционной функции.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим систему многофазных сигналов [1–7] на основе кода Задова – Чу с нулевым уровнем боковых лепестков (УБЛ) периодической автокорреляционной функции (АКФ). Фаза таких сигналов (1) изменяется по квадратичному или линейно-квадратичному закону.

$$\varphi_n = \begin{cases} \frac{\pi}{N} n^2 \cdot q, & N - \text{четное} \\ \frac{\pi}{N} \cdot q \cdot n(n+1), & N - \text{нечетное} \end{cases} \quad (1)$$

$$n = 0, \dots, N - 1,$$

где  $N$  – число элементов в последовательности;  
 $n$  – порядковый номер элемента, начиная с нулевого;

$q$  – целое число, взаимно простое с  $N$ .

Примечательность сигналов на основе кодов Задова – Чу состоит в большом объеме различных вариантов: для данного числа  $N$  элементов в последовательности существует

$N_1$  вариантов реализации, определяемых количеством взаимно простых с  $N$  чисел  $q$ .

В табл. 1 представлены наборы взаимно простых чисел для последовательностей с разным числом элементов (жирным курсивом выделены варианты, имеющие простое число элементов последовательности  $N$ ).

Эффективность системы сигналов на основе кода Задова – Чу состоит в использовании последовательностей с таким числом элементов  $N$ , для которых, с одной стороны, количество вариантов  $N_1$  реализации будет максимально большим, а с другой стороны, взаимнокорреляционные свойства максимального их числа будут хорошими (максимальный уровень ВКФ будет меньше установленного порогового значения). Эти два критерия сужают число сигналов относительно потенциально возможного, что связано с величиной установленного порогового значения, диктуемого областью использования системы сигналов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера на рис. 1 для сигнала на основе кода Задова – Чу из 13 элементов изображены АКФ ( $q = 1$ ) и ВКФ ( $q_1 = 1$  и  $q_2 = 5$ ).

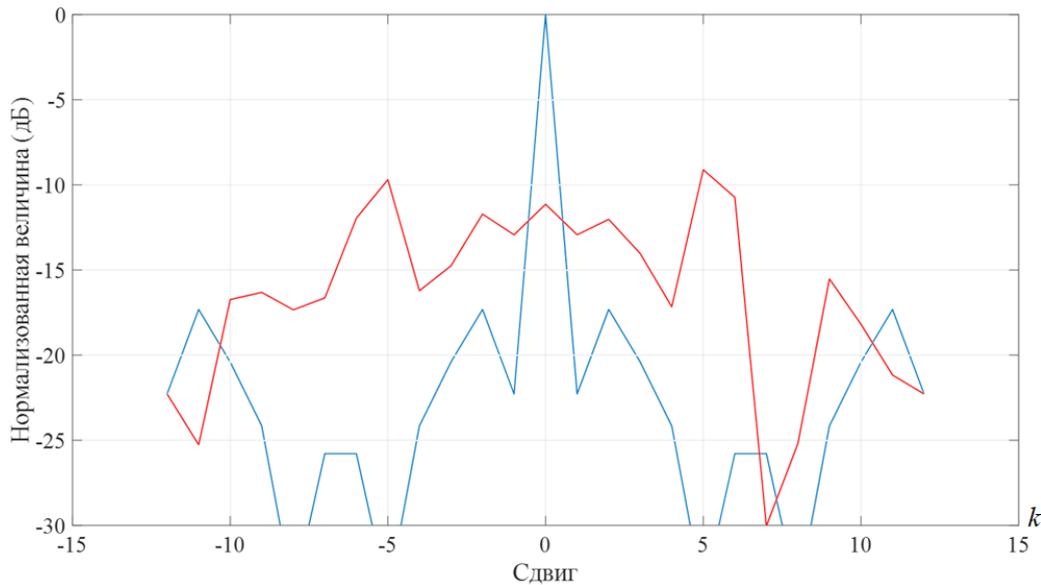
Из анализа приведенных зависимостей следует, что для системы сигналов на основе кодов Задова – Чу автокорреляция (УБЛ АКФ –17,3 дБ) получается существенно лучше взаимокорреляции (уровень ВКФ –9,1 дБ).

Таблица 1

Взаимно простые числа

$N$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
$q$	1	<b>1</b> 2	1 3	<b>1</b> 2 3 4	1 5	<b>1</b> 2 3 4 5 6	1 3 5 7	1 2 4 5 7 8	1 3 5 7 9	<b>1</b> 2 3 4 5 6 7 8 9 10	1 5 7 11	<b>1</b> 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 3 5 7 9 11 13	1 2 4 7 8 11 13 14	1 2 3 4 5 7 8 9 11	1 3 5 7 11

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.



**Рис. 1.** АКФ (синяя) для  $q = 1$  и ВКФ (красная) при  $q_1 = 1$  и  $q_2 = 5$  для последовательности из 13 элементов  
 Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

АКФ имеет симметричный относительно нулевого сдвига и более регулярный характер по сравнению с ВКФ, причем при сдвиге на 12 элементов уровни АКФ и ВКФ численно совпадают, что доказывается в [8] при обосновании коэффициента эффективности радиоимпульсных последовательностей.

Анализ корреляционных и взаимокорреляционных характеристик системы сигналов на основе кодов Задова – Чу выявил необходимость разделения системы сигналов на четыре категории в зависимости от числа элементов  $N$  в последовательности:

- простые числа;
- нечетные числа за исключением простых;
- четные числа, относящиеся к ряду  $2^n$ ,  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ ;
- четные числа за исключением чисел, относящихся к ряду  $2^n$ ,  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

Для иллюстрации этого в табл. 2–5 представлены УБЛ АКФ и уровень ВКФ:

$N = 13$  – простое число;

$N = 14$  – четное число, не относящееся к  $2^n$ ;

$N = 15$  – нечетное число, не относящееся к простым;

$N = 16$  – четное число, относящееся к  $2^n$  ( $n = 4$ ).

Максимально большое количество взаимно простых чисел  $N_1$  получается для последо-

вательностей, состоящих из простого числа элементов (3, 5, 7, 11, 13, 17 и т. д.):

$$N_1 = N - 1.$$

В табл. 2 приведены УБЛ АКФ и уровень ВКФ последовательности из 13 элементов (числа по главной диагонали соответствуют УБЛ АКФ, выше главной диагонали – уровень ВКФ).

Из табл. 2. следует, что наилучшие корреляционные свойства (значения на главной диагонали) имеют сигналы с  $q = 1$  и  $q = 12$ . На рис. 2 изображена гистограмма распределения максимальных значений уровня ВКФ для последовательности из 13 элементов (УБЛ АКФ для  $q = 1$  при этом составляет  $-17,3$  дБ).

В табл. 3 приведены УБЛ АКФ и уровень ВКФ последовательности из 14 элементов (четное число).

На рис. 3 изображена гистограмма распределения максимальных значений уровня ВКФ для последовательности из 14 элементов (УБЛ АКФ для  $q = 1$  при этом составляет  $-17,8$  дБ).

Сравнение рис. 3 и 2 показывает лучшие взаимокорреляционные свойства для простого числа 13 (гистограмма при этом расположена левее – в области меньших значений УБЛ).

Таблица 2

Уровень боковых лепестков (дБ) для  $N = 13$

$q_1/q_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-17,3	-9,6	-9,6	-7,9	-9,1	-9,3	-9,1	-8,8	-9,6	-8,6	-8,7	-7,6
2		-9,9	-9,0	-9,6	-7,2	-9,1	-7,7	-8,8	-8,7	-8,4	-8,6	-8,7
3			-11,5	-9,1	-10,6	-8,9	-6,8	-8,5	-7,9	-8,7	-8,4	-8,6
4				-13,4	-9,1	-10,1	-8,3	-9,7	-6,5	-7,9	-8,7	-9,6
5					-10,4	-8,7	-9,6	-7,1	-9,7	-8,5	-8,8	-8,8
6						-16,2	-9,1	-9,6	-8,3	-6,8	-7,7	-9,1
7							-16,2	-8,7	-10,1	-8,9	-9,1	-9,3
8								-10,4	-9,1	-10,6	-7,2	-9,1
9									-13,4	-9,1	-9,6	-7,9
10										-11,5	-9,0	-9,6
11											-9,9	-9,7
12												-17,3

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

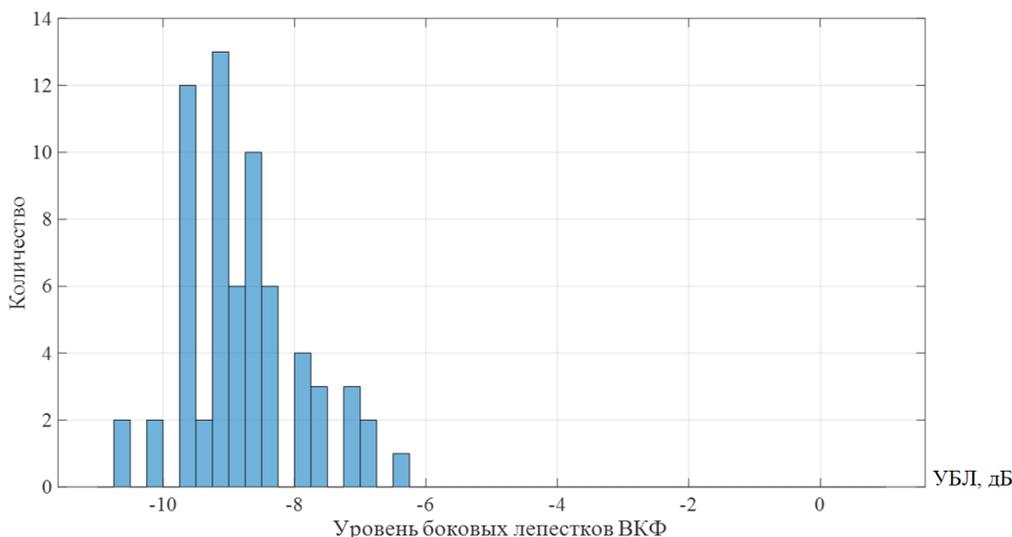


Рис. 2. Гистограмма максимальных значений уровня ВКФ для 13 элементов в последовательности (простое число)

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Таблица 3

Уровень боковых лепестков (дБ) для  $N = 14$

$q_1/q_2$	1	3	5	9	11	13
1	-17,8	-7,1	-8,5	-6,8	-7,7	-7,8
3		-10,8	-7,7	-7,7	-8,5	-7,7
5			-13,9	-8,5	-7,7	-6,8
9				-13,9	-7,7	-8,5
11					-10,8	-7,1
13						-17,8

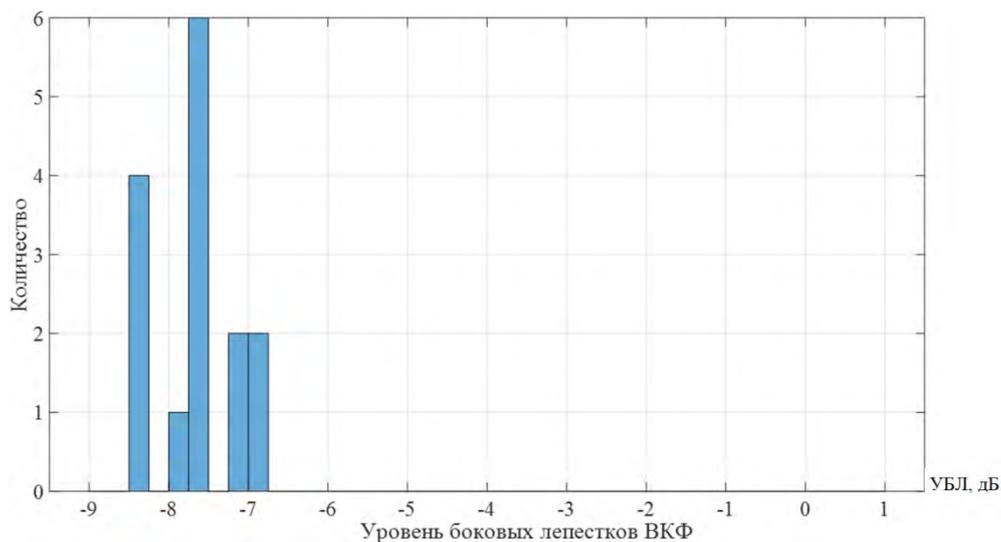
Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

В табл. 4 приведены УБЛ АКФ и уровень ВКФ последовательности из 15 элементов (нечетное число, не являющееся простым).

На рис. 4 изображена гистограмма распределения максимальных значений уровня

ВКФ для последовательности из 15 элементов (УБЛ АКФ для  $q = 1$  при этом составляет  $-18,3$  дБ).

Особенностью гистограммы для 15 элементов в последовательности является значи-



**Рис. 3. Гистограмма максимальных значений уровня ВКФ для 14 элементов в последовательности (четное число)**

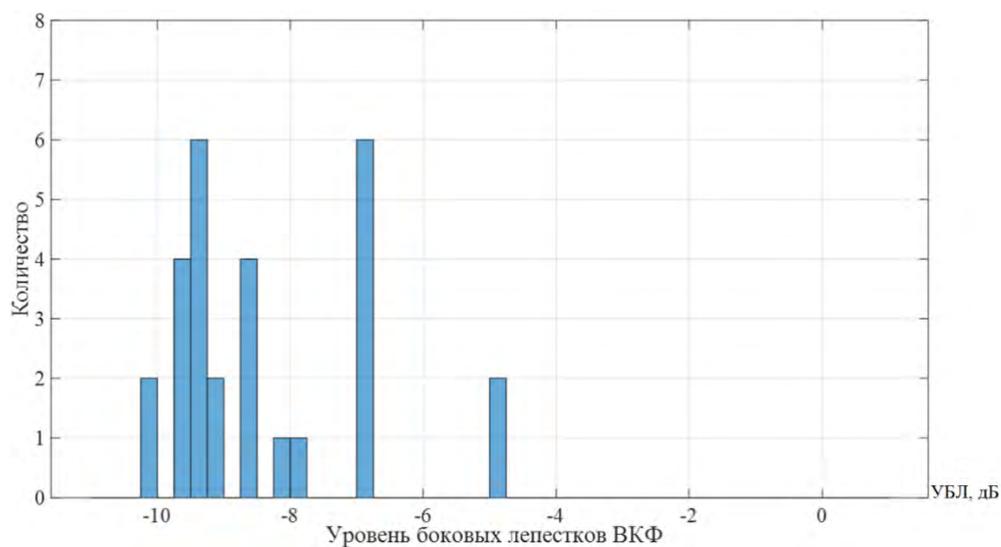
Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Таблица 4

**Уровень боковых лепестков (дБ) для  $N = 15$**

$q_1/q_2$	1	2	4	7	8	11	13	14
1	-18,3	-9,4	-9,4	-6,9	-9,4	-4,7	-6,9	-7,9
2		-9,9	-9,7	-8,6	-6,9	-9,0	-8,2	-6,9
4			-12,5	-10,0	-8,5	-9,6	-9,0	-4,8
7				-15,8	-9,7	-8,5	-6,9	-9,4
8					-15,8	-10,0	-8,6	-6,9
11						-12,5	-9,7	-9,4
13							-9,9	-9,4
14								-18,3

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.



**Рис. 4. Гистограмма максимальных значений уровня ВКФ для 15 элементов в последовательности (нечетное число)**

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

тельный удельный вес сигналов с достаточно большим уровнем ВКФ (–7 дБ и –5 дБ).

В табл. 5 приведены УБЛ АКФ и уровень ВКФ последовательности из 16 элементов.

На рис. 5 изображена гистограмма распределения максимальных значений уровня ВКФ для последовательности из 16 ( $16 = 2^4$ ) элементов (УБЛ АКФ для  $q = 1$  при этом составляет –18,3 дБ).

Особенностью гистограммы для 16 элементов в последовательности является значительный удельный вес сигналов (42,8%) с очень большим уровнем ВКФ (–6 дБ и –3 дБ).

Анализ приведенных таблиц и гистограмм показывает, что наилучшие взаимнокорреляционные свойства системы сигналов на основе кода Задова – Чу (максимальное смещение максимума гистограммы влево – в сторону

минимальных боковых лепестков и минимальное наличие остатков с большим уровнем боковых лепестков справа) наблюдается для последовательностей с числом элементов  $N$ , являющихся простым числом. Наихудший результат показывают последовательности с четным числом элементов, представляющим собой  $N = 16 = 2^4$ .

С ростом числа элементов в последовательности гистограммы распределения максимального уровня ВКФ становятся более регулярными одномодовыми (для нечетного числа элементов в последовательности  $N$ ) или многомодовыми (для четного числа элементов в последовательности  $N$ ). На рис. 6 изображены распределения максимальных значений уровня ВКФ для большого числа элементов в последовательности (простое число 257).

Таблица 5

Уровень боковых лепестков (дБ) для  $N = 16$

$q_1/q_2$	1	3	5	7	9	11	13	15
1	-18,7	-8,3	-6,0	-9,0	-3,0	-9,0	-6,0	-8,3
3		-11,5	-8,7	-6,0	-9,0	-3,0	-9,0	-6,0
5			-14,9	-8,3	-6,0	-9,0	-3,0	-9,0
7				-10,1	-9,0	-6,0	-9,0	-3,0
9					-10,1	-8,3	-6,0	-9,0
11						-14,9	-8,7	-6,0
13							-11,5	-8,3
15								-18,7

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

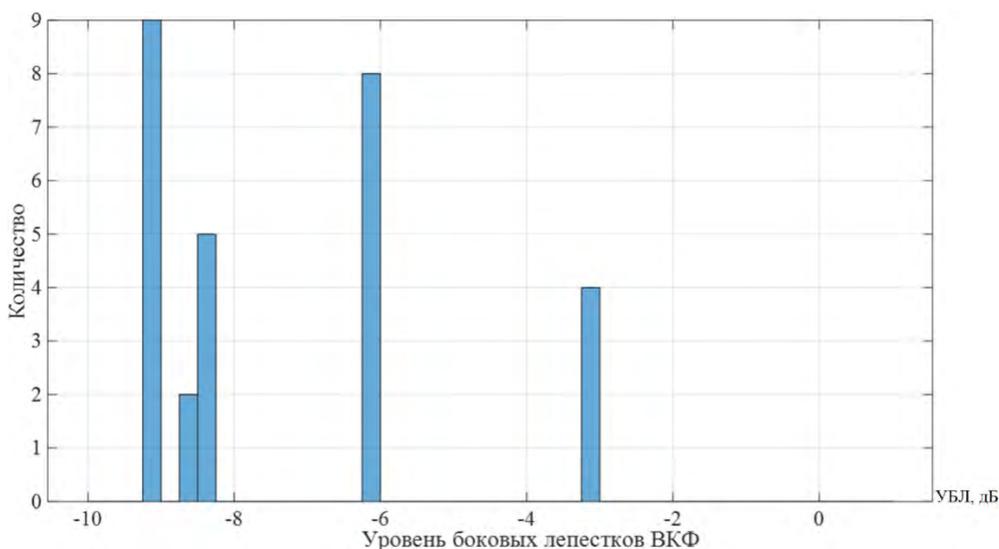
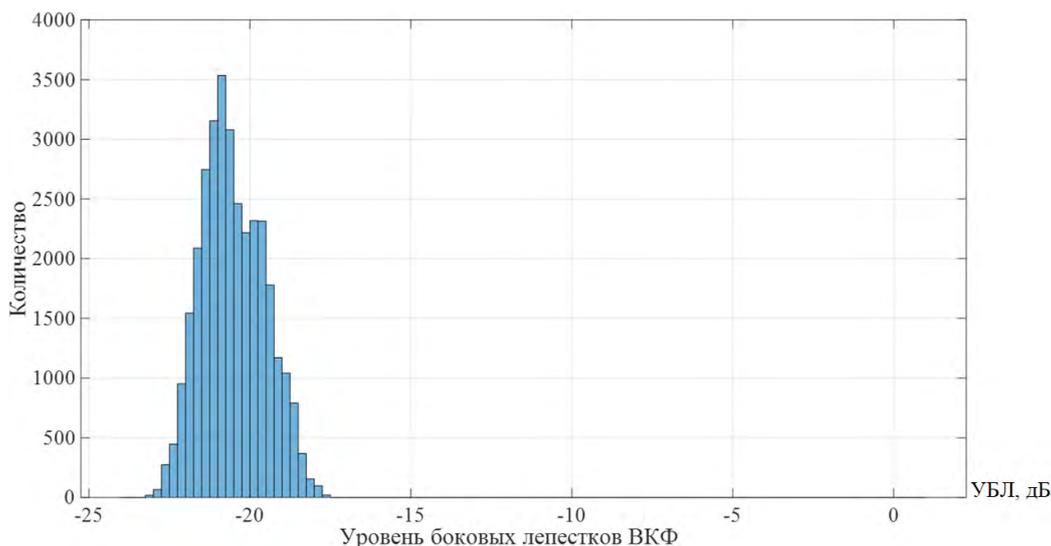


Рис. 5. Гистограмма максимальных значений уровня ВКФ для 16 элементов в последовательности (четное число  $16 = 2^4$ )

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.



**Рис. 6. Гистограмма максимальных значений уровня ВКФ для 257 элементов в последовательности (простое число)**

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Максимум гистограммы максимальных значений УБЛ ВКФ расположен правее на 9 дБ относительно координаты УБЛ АКФ ( $-30,4$  дБ).

Приведенные зависимости УБЛ ВКФ и корреляционных свойств дают информацию для выбора параметров сигналов из системы сигналов на основе кодов Задова – Чу в качестве системы сигналов, либо для выбора определенных вариантов реализации при ограничении на конкретное число элементов в последовательности  $N$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сложные системы многофазных радиопульсных сигналов на основе кодов Задова – Чу обладают идеальными периодическими автокорреляционными свойствами (нулевой УБЛ периодической АКФ) и реализуемыми схемами формирования.

2. Максимальный объем  $N_1 = N - 1$  имеют системы сигналов на основе кодов Задова – Чу при простом числе элементов  $N$ , меньший объем (в интервале от  $0,5N$  до  $0,86N$ ) при нечетном (не являющимся простым) числе элементов, еще меньше (около  $0,5N$ ) при четном числе элементов.

3. Минимальный уровень взаимной корреляции демонстрируют системы сигналов на основе кодов Задова – Чу при простом числе элементов  $N$ , однако его величина превышает уровень боковых лепестков автокорреляционных функций сигналов, взаимная корреляция которых рассматривается.

4. Представленные результаты могут быть полезными при выборе системы сигналов многоканальной системы связи, поскольку такие сигналы могут передаваться в общей полосе частот и одновременно по времени, но будут разделены на приемной стороне при согласованной обработке.

## Список источников

1. Zhou Z., Hellesteth T., Parampalli U. A family of polyphase sequences with asymptotically optimal correlation // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2018. Vol. 64, no. 4. P. 2896–2900. <http://dx.doi.org/10.1109/TIT.2018.2796597>.
2. Русанов В. Э. Исследование свойств автокорреляционной функции одного периода последовательности Задова – Чу // *Экономика и качество систем связи*. 2024. № 1. С. 53–59.

## References

1. Zhou Z., Hellesteth T., Parampalli U. A family of polyphase sequences with asymptotically optimal correlation. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2018;64(4):2896–2900. <http://dx.doi.org/10.1109/TIT.2018.2796597>.
2. Rusanov V. E. Research of the properties of the autocorrelation function of one period of the Zadov–Chu sequence. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*. 2024;(1):53–59. (In Russ.).

3. Степутин А. Н., Николаев А. Д. Последовательности Задова – Чу (ZC последовательности). URL: <https://1234g.ru/book/ZC.pdf> (дата обращения: 10.04.2025).
4. Киселева Т. П. Исследование свойств циклической автокорреляционной функции последовательности Задова – Чу в зависимости от характеристик квантования элементов последовательности // *Цифровая Обработка Сигналов*. 2018. № 4. С. 40–44.
5. Казачков В. О. Исследование реализации синхронизации по сигналам Задова – Чу в стандарте Long Term // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2015. Т. 7, № 1. <http://dx.doi.org/10.15862/39TVN115>.
6. Салтыков О. В. Алгоритм тактовой и частотной синхронизации КВ-модема // *Техника радиосвязи*. 2021. Вып. 3. С. 7–16. <https://doi.org/10.33286/2075-8693-2021-50-07-16>.
7. Киселева Т. П. Применение комплексных последовательностей Задова – Чу для заполнения циклического префикса OFDM-символов технологии LTE: патент № 2766286C1 Российская Федерация, № 2021102576; заявл. 04.02.2021; опубл. 11.03.2022, бюл. № 8. 10 с.
8. Дёмко А. И. Алмазова Е. Г. Оценка минимального достижимого уровня боковых лепестков функции неопределенности радиоимпульсных последовательностей // *Вестник кибернетики*. 2024. Т. 23, № 3. С. 96–102.
3. Steputin A. N., Nikolaev A. D. Posledovatelnosti Zadova–Chu (ZC posledovatelnosti). URL: <https://1234g.ru/book/ZC.pdf> (accessed: 10.04.2025). (In Russ.).
4. Kiseleva T. P. Investigation of properties of cyclic autocorrelation function of the sequence depending on the characteristics of quantization of the sequence elements. *Digital Signal Processing*. 2018;(4):40–44. (In Russ.).
5. Kazachkov V. O. Investigation of synchronization implementation on Zadoff-Chu signals in Long Term Evolution standard for fading channel. *Naukovedenie*. 2015;7(1). <http://dx.doi.org/10.15862/39TVN115>. (In Russ.).
6. Saltykov O. V. HF modem clock and frequency synchronization algorithm. *Radio Communication Technology*. 2021;(3):7–16. <https://doi.org/10.33286/2075-8693-2021-50-07-16>. (In Russ.).
7. Kiseleva T. P. Application of complex sequences of Zadoff-Chu for filling of OFDM-symbols cyclic prefix of LTE technology. RU Patent 2766286C1 No. 2021102576, filed February 4, 2021, issued March 11, 2022. 10 p. (In Russ.).
8. Dyomko A. I., Almazova E. G. Assessment of minimum achievable sidelobes level of ambiguity function for radio pulse sequences. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(3):96–102. (In Russ.).

### Информация об авторе

**А. И. Дёмко** – кандидат технических наук, доцент, почетный работник высшего образования РФ;

<https://orcid.org/0000-0003-0747-0294>,  
dai321@mail.ru

### About the author

**A. I. Dyomko** – Candidate of Sciences (Engineering), Docent, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation;

<https://orcid.org/0000-0003-0747-0294>,  
dai321@mail.ru

Научная статья  
УДК 656.13.08(571.1)  
<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-4>



## Имитационное моделирование в задачах реорганизации и анализа дорожного движения

Лариса Юрьевна Запезалова<sup>✉</sup>, Станислав Игоревич Валуев,  
Андрей Валентинович Запезалов  
Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается методика разработки и оптимизации режима работы светофорного объекта с учетом изменений в организации дорожного движения на примере перекрестка города Сургута. Целью исследования является анализ альтернативных вариантов организации дорожного движения на одном из регулируемых перекрестков города Сургута.

Проведен анализ причин, влияющих на снижение пропускной способности, рассмотрены несколько вариантов схем пофазного разъезда транспорта на перекрестке с учетом пешеходных маршрутов. Исследование выполнено с применением имитационного моделирования. При настраивании светофорного движения на перекрестке учитывались методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения Министерства транспорта Российской Федерации. Оценка точности модели проведена на основании критерия Хейверса. Для анализа альтернативных вариантов реорганизации дорожного движения проведена мультипликативная свертка векторного показателя в скалярный. Результаты исследования могут применяться для решения задач анализа и оптимизации светофорного регулирования, а также в образовательных целях при освоении программ бакалавриата или магистратуры.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, транспортные потоки, светофорное регулирование, оптимизация режимов работы, критерий Хейверса, мультипликативная свертка

**Для цитирования:** Запезалова Л. Ю., Валуев С. И., Запезалов А. В. Имитационное моделирование в задачах реорганизации и анализа дорожного движения // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 3. С. 34–43. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-4>.

Original article

## Simulation modeling in traffic reorganization and analysis

Larisa Yu. Zapevalova<sup>✉</sup>, Stanislav I. Valuev, Andrey V. Zapevalov  
Surgut State University, Surgut, Russia

**Abstract.** The paper examines methods for developing and optimizing the operating mode of a traffic light, given changes in the traffic organization, using the example of an intersection in Surgut. The paper analyzes alternative traffic management options at one of the controlled intersections in Surgut.

The authors analyze causes influencing the traffic capacity decrease and several alternate designs for incremental traffic regulation at the intersection, taking into account pedestrian passes. The research is carried out using simulation modeling. During the traffic lights setting up at the intersection, the methodological recommendations for the development and implementation of traffic regulation measures from the Ministry of Transport of the Russian Federation are considered. The accuracy of the model is assessed based on the GEH statistic. To analyze alternative options for the traffic reorganization, a multiplicative convolution of a vector indicator into a nonvector one is carried out. The research results can be used to solve problems of traffic light regulation analysis and optimization, as well as for educational purposes in bachelor's or master's degree programs.

**Keywords:** simulation modeling, traffic flows, traffic signalization, operating modes optimization, GEH statistic, multiplicative convolution

**For citation:** Zapevalova L. Yu., Valuev S. I., Zapevalov A. V. Simulation modeling in traffic reorganization and analysis. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(3):34–43. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-4>.

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях интенсивного развития транспортной инфраструктуры особую актуальность приобретает проблема организации бесконфликтного взаимодействия участников транспортного движения, обеспечивающая высокую пропускную способность транспорта и пешеходов. Изменение организации дорожного движения требует тщательного анализа текущей ситуации. На основании анализа могут быть предложены менее затратные варианты решения проблемы, например такие, как изменение схемы движения (разрешение поворотов, введение одностороннего движения, корректировки режимов работы светофоров и т. п.), или более затратные, такие как организация локального уширения, изменение конфигурации транспортного узла.

Опишем вариант оптимизации работы светофорного объекта для обеспечения безопасности и эффективности транспортных и пешеходных потоков на одном из перекрестков города Сургута.

Светофорный объект относится к стохастическим системам, исследование которых целесообразно проводить на основе имитационного моделирования. При этом именно имитационная модель на уровне мезо- и микромоделирования позволяет получить результат с высокой точностью [1].

На сегодняшний день существует множество подходов к созданию математических моделей транспортных потоков [2]. При этом значительную роль играет имитационное моделирование. В зависимости от уровня детализации представления исследуемой системы могут применяться процессный подход, агентный или системная динамика [3, 4]. В качестве инструментария использована система имитационного моделирования PTV Vissim, позволяющая создавать модели на микроуровне, представляя каждый элемент системы регулируемого дорожного движения на перекрестке [5].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования выбран один из наиболее загруженных транспортными потоками перекресток г. Сургута. Исходными данными для исследования является планировочная схема проезжей части перекрестка, текущая организация дорожного движения на нем, текущий режим работы светофорного объекта, интенсивность движения транспорта с учетом его разновидностей (легковой, грузовой транспорт и общественный) и пешеходов.

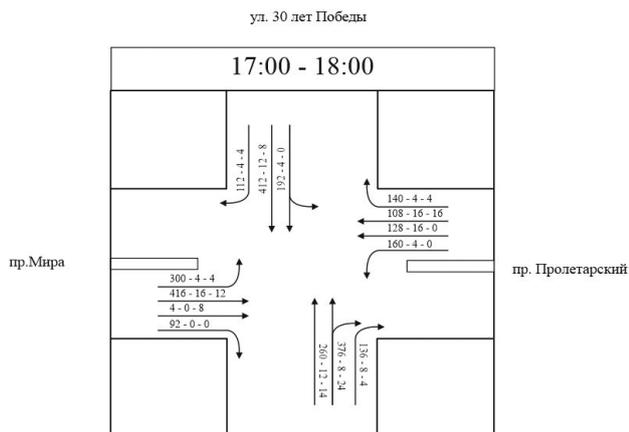
В ходе исследования были использованы следующие методы:

- построение детальной геометрической модели перекрестка;
- настройка параметров транспортных потоков;
- оценка точности модели;
- моделирование различных сценариев организации движения;
- анализ показателей эффективности работы светофорного объекта.

*Исходные данные.* Пиковая суточная активность движения на перекрестке проявляется в утреннее время с 7:00 до 8:00, дневное с 13:00 до 14:00 и вечернее с 17:00 до 18:00. Картина движения в отмеченные периоды отличается несущественно. Для обобщенной оценки эффективности режимов регулирования движения выбрано моделирование ситуации в вечернее время в интервале с 17:00 до 18:00. На рис. 1 отображена интенсивность движения транспортных средства по полосам, где три последовательных численных значения отображают:

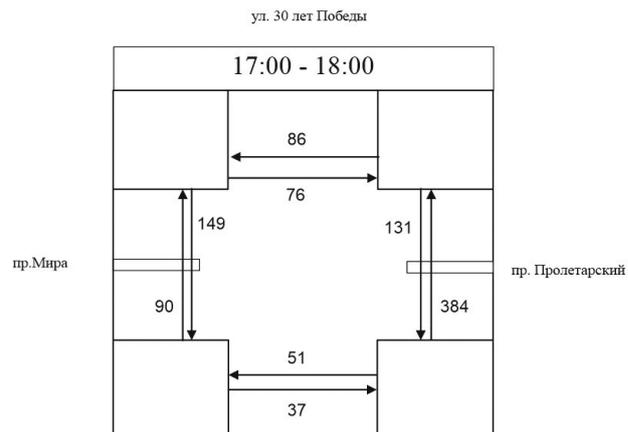
- легковые транспортные средства;
- грузовые транспортные средства;
- автобусы.

На схеме отражено, что движение транспорта снизу вверх по улице 30 лет Победы с поворотом налево запрещено. Интенсивность пешеходного движения представлена на рис. 2.



**Рис. 1. Интенсивность движения транспорта на перекрестке**

Примечание: составлено авторами на основании замеров.



**Рис. 2. Интенсивность движения пешеходов по перекрестку**

Примечание: составлено авторами на основании замеров.

Параметры регулирования включают в себя режимы светофорного регулирования (число фаз, порядок их чередования, длительности цикла, основных и промежуточных тактов).

Режим работы светофорного объекта состоит из:

- схемы пофазного разъезда (рис. 3), где 1 Н-10 Н – направления движения;
- параметров светофорного регулирования (табл. 1);
- временной диаграммы светофорного цикла (рис. 4).

Особенностью существующей схемы организации разъезда является отсутствие поворота налево при движении по улице 30 лет Победы на север-запад (снизу вверх налево, рис. 1). Это обстоятельство приводит к возникновению заторов при выезде с перекрестка, поскольку водители прокладывают маршрут по следующему, по ходу движения, перекрестку.

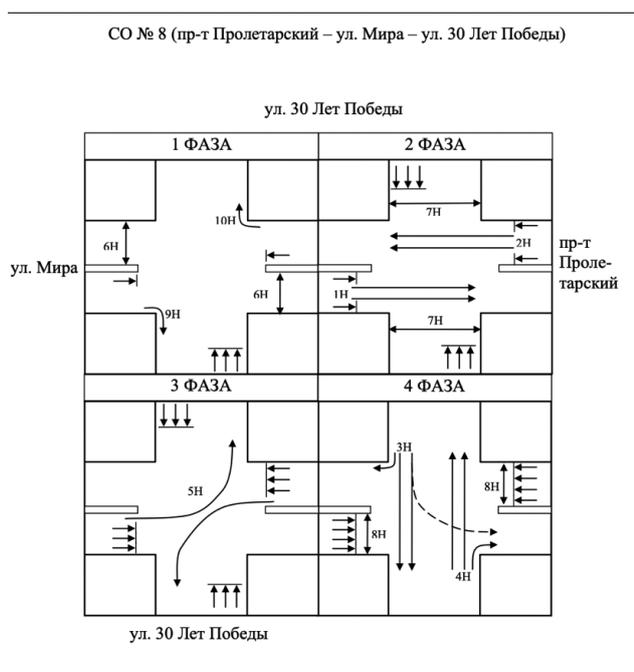
Параметры светофорного регулирования состоят из общего времени цикла ( $T_{цикла}$ ), который делится на промежуточный такт ( $T_{пром}$ ) для обеспечения безопасного завершения проезда перекрестка участниками дорожного движения, и основной такт ( $T_{осн}$ ) для обеспечения движения определенного направления.

Задача – предложить оптимальную схему организации движения и схему пофазного разъезда для перекрестка (с указанием времени фаз и промежуточных тактов), которые позволят не допустить образования заторов на перекрестке, обеспечить безопасность движения транспортного и пешеходного потока.

Исследование проводилось на имитационной модели.

Создание модели дорожного движения на перекрестке включает в себя несколько этапов:

- отрисовка дорожной сети,
- ввод в модель количественных данных,
- расстановка правил проезда,
- ввод светофорного регулирования,
- ввод в модель маршрутов общественного транспорта,
- создание пешеходных маршрутов,



**Рис. 3. Схема пофазного разъезда действующего режима**

Примечание: составлено авторами.

Параметры светофорного регулирования действующего режима

Фаза	Тпром, сек.	Тосн, сек.
1	21	15
2	8	33
3	8	23
4	10	33
Тцикла = 151 сек.		

Примечание: составлено авторами.

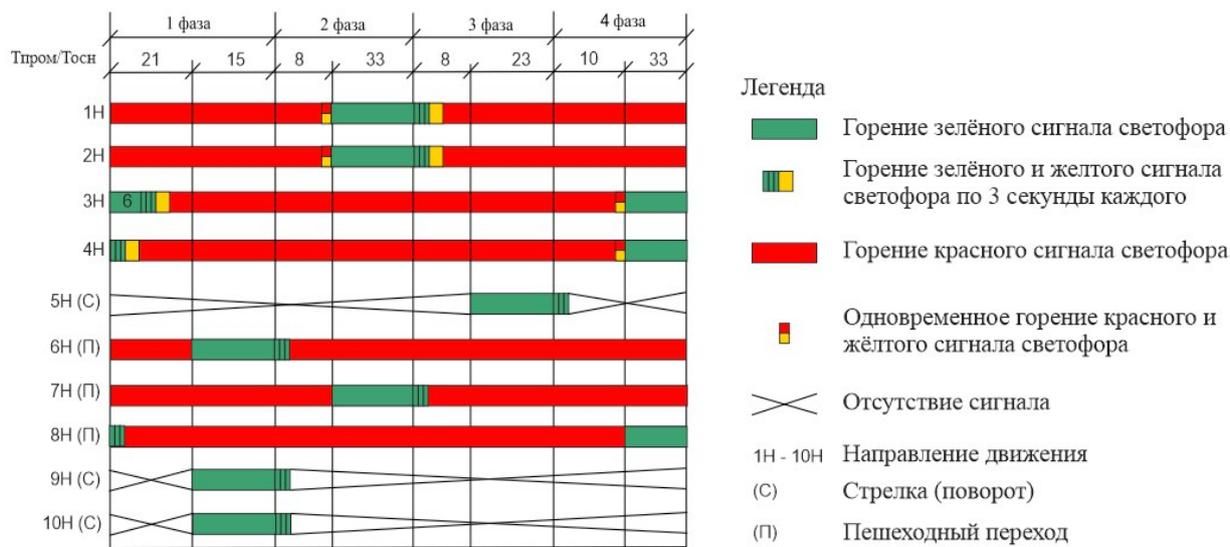


Рис. 4. Временная диаграмма светофорного цикла действующего режима

Примечание: составлено авторами.

- отрисовка разметки,
- настройка манеры езды при смене полосы движения,
- реакции после конца красного сигнала,
- добавление статических 3D-объектов,
- создание объектов для анализа модели.

В качестве объектов для анализа выбраны следующие параметры:

- количество транспортных средств, проехавших через перекресток,
- средняя величина затора,
- максимальная величина затора.

На основании данных о текущем функционировании составлена модель с действующим режимом (рис. 5).

Для оценки точности модели используется GEN-статистика (1) [1]. GEN-статистика (критерий Хейверса) используется в проектировании дорожного движения, прогнозировании трафика и моделировании дорожного движения для сравнения двух наборов объемов трафика.

$$GEN = \sqrt{\frac{(V - C)^2}{(V + C)/2}}, \quad (1)$$

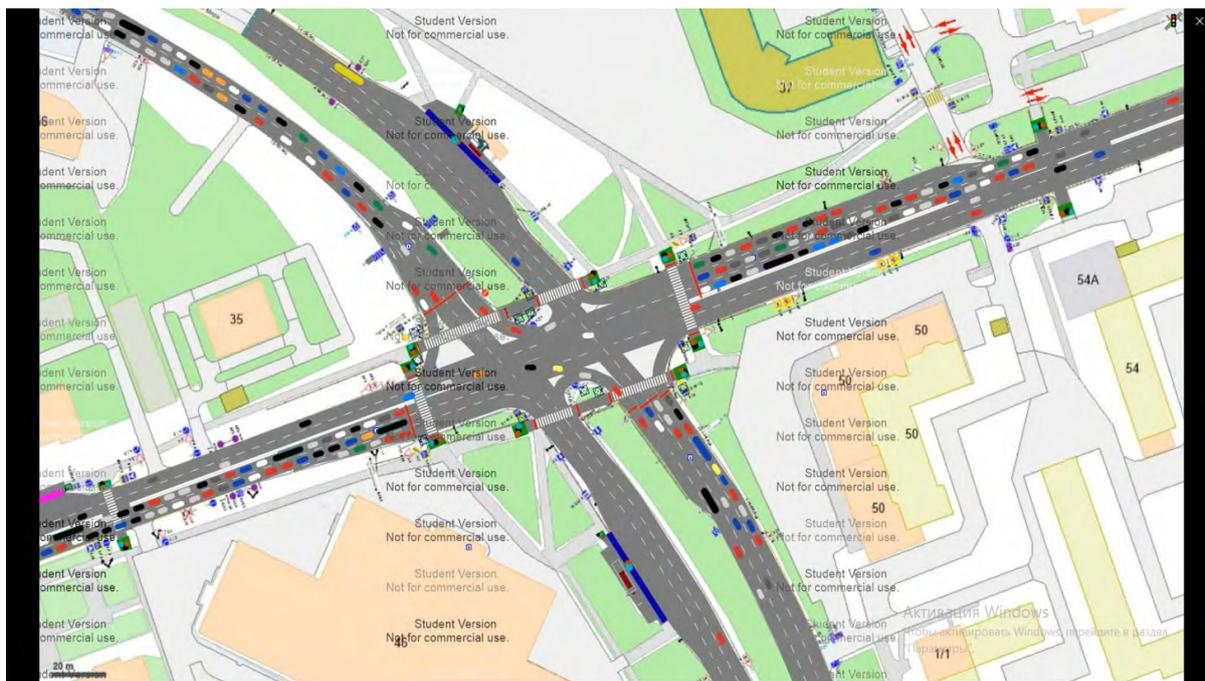
где:  $V$  – смоделированные значения,  $C$  – измеренные значения.

Для принятия решения о приемлемой точности модели полученное значение критерия Хейверса должно быть меньше граничного, равного 5. После калибровки модели получили  $GEN = 4,76$ , что говорит о приемлемой точности модели.

*Разработка новых сценариев.* На основе анализа существующих проблемных ситуаций введены следующие изменения.

– Предложены четыре альтернативных варианта схем пофазного разъезда на перекрестке (рис. 6–9).

– Для каждого варианта разработаны три режима работы светофорной сигнализации (параметры светофорного регулирования и временной диаграммы).

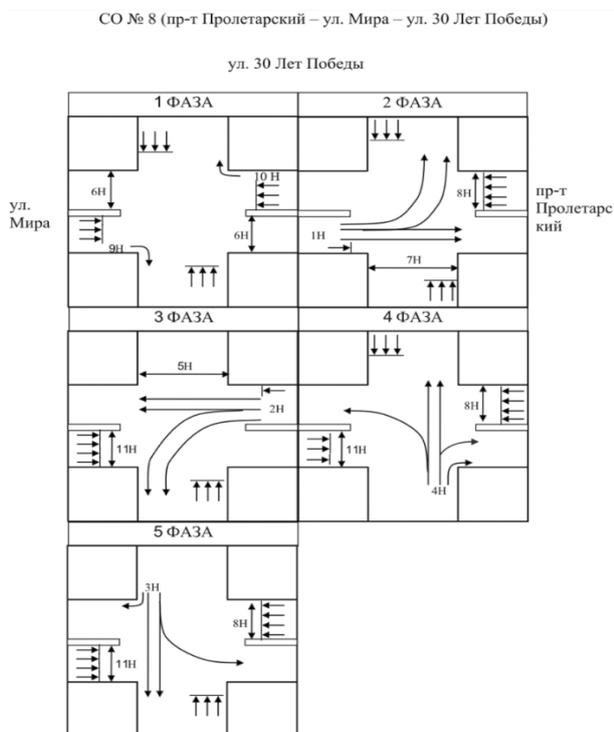


**Рис. 5. Имитационный прогон модели с действующим режимом**  
 Примечание: составлено авторами.

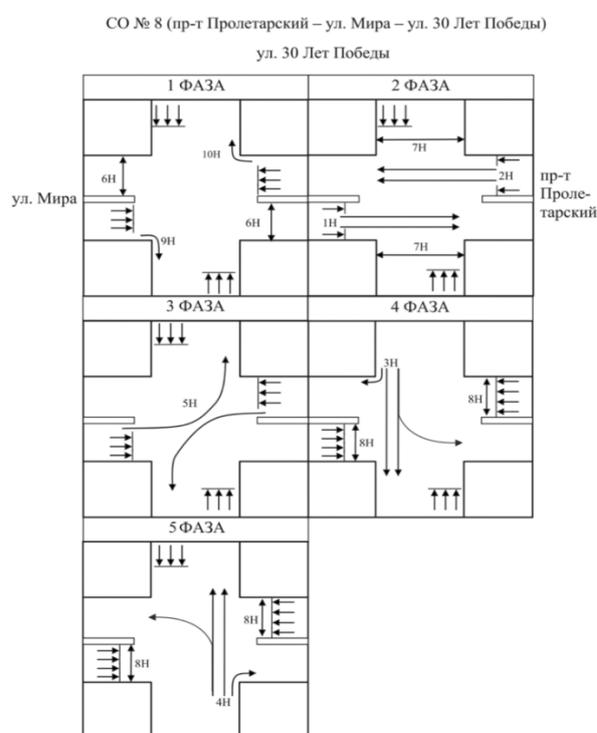
Все предложенные варианты схем пофазного проезда решают вопрос организации поворота налево при движении по улице 30 лет Победы на север-запад (снизу вверх налево,

рис. 1). Сравнительный анализ схем пофазного проезда представлен в табл. 2.

Во втором, третьем и четвертом вариантах используется выделенная полоса для движе-

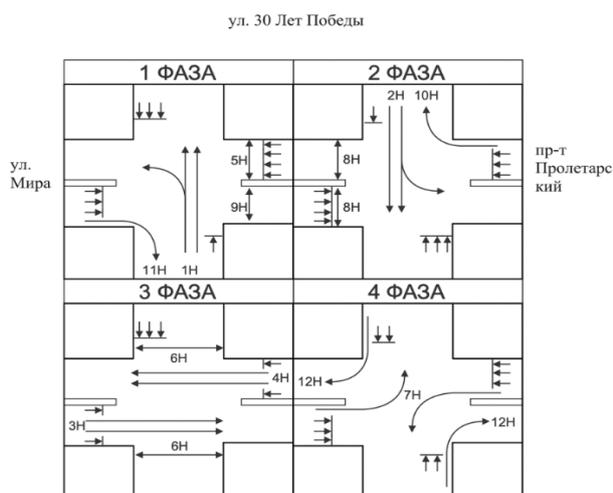


**Рис. 6. Первый вариант схемы пофазного разезда**  
 Примечание: составлено авторами.

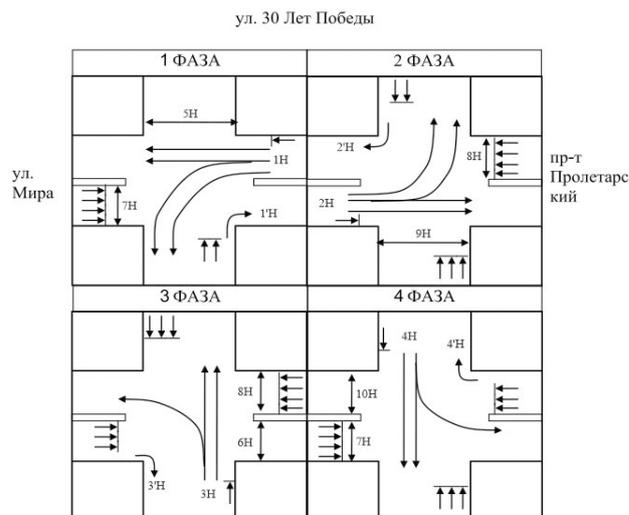


**Рис. 7. Второй вариант схемы пофазного разезда**  
 Примечание: составлено авторами.

СО № 8 (пр-т Пролетарский – ул. Мира – ул. 30 Лет Победы)



**Рис. 8. Третий вариант схемы пофазного разезда**  
Примечание: составлено авторами.



**Рис. 9. Четвертый вариант схемы пофазного разезда**  
Примечание: составлено авторами.

ния направо или налево в отдельной фазе. При таком подходе возникают условия перегруженности крайних полос движения. Кроме того, складываются предпосылки провоцирования участниками движения конфликтных ситуаций при попытке поздних перестроений перед перекрестком и нарушение рядности движения. В соответствии с этими факторами принято решение о создании расчета режима работы светофорной сигнализации первого варианта.

Для выбранного варианта № 1 проводились дополнительные исследования влияния длительности фаз на пропускную способность перекрестка. Рассмотрено три режима регулировки. В первом режиме светофорного регулирования сохранена продолжительность общего времени цикла 151 секунда (табл. 3, рис. 10) по аналогии с действующим, а в двух

других – 140 (табл. 4, рис. 11) и 145 (табл. 5, рис. 12) соответственно.

Временные параметры основного цикла выбраны исходя из минимального времени активности пешеходной фазы, рассчитанной по формуле (2) согласно п. 5.4.1.3 ГОСТа Р 70716-2023 [6]:

$$T = \frac{D}{1,3} + 5, \quad (2)$$

где:

$T$  – минимальное время пешеходной фазы (с);  
 $D$  – расстояние перехода по длинной стороне перехода (м);

1,3 – расчетная скорость движения пешехода (м/с);

5 – запас времени для маломобильных групп населения (с).

Таблица 2

**Сравнительный анализ схем пофазного проезда**

Критерий	Действующая схема	1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант
Количество фаз	4	5	5	4	4
Соблюдение принципа неувеличения количества фаз в цикле регулирования	-	-	-	+	+
Соблюдение принципа поэтапного перехода улицы пешеходами в течение двух следующих друг за другом фаз	-	+	+	-	+
Отдельная полоса для поворота направо/налево в отдельной фазе	+	-	+	+	+

Примечание: составлено авторами.

Таблица 3

Параметры светофорного регулирования первого варианта

Фаза	Тпром	Тосн
1	9	16
2	8	24
3	10	24
4	10	20
5	10	20
Тцикла = 151 с		

Примечание: составлено авторами.



Рис. 10. Временная диаграмма светофорного цикла первого варианта

Примечание: составлено авторами.

Таблица 4

Параметры светофорного регулирования второго варианта

Фаза	Тпром	Тосн
1	8	16
2	8	20
3	8	24
4	8	20
5	8	20
Тцикла = 140 с		

Примечание: составлено авторами.

Время промежуточного такта составлялось на основе параметров промежуточных тактов действующего режима.

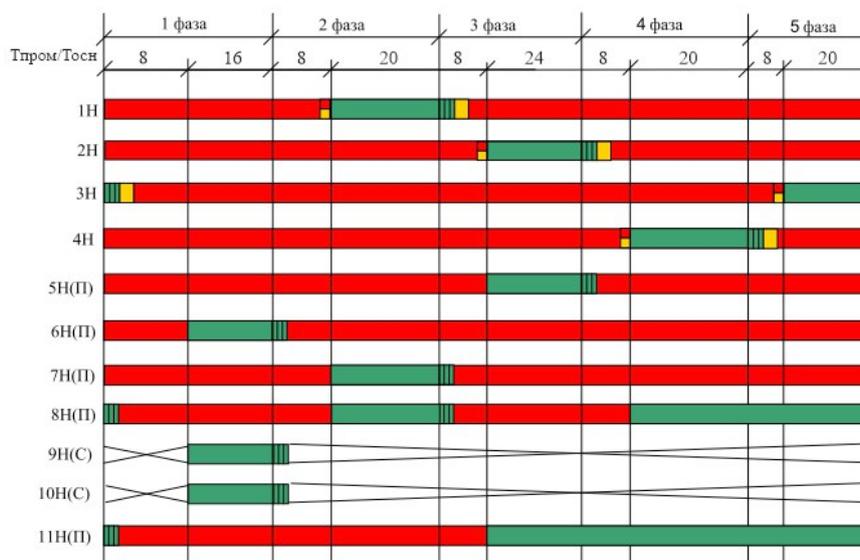
В третьем варианте было использовано среднее значение между минимальным и исследуемым вариантами и увеличение времени в пользу первого и четвертого направлений ввиду их наибольшей нагрузки.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Для моделирования новых проектных решений необходимо внести изменения в реализованную модель.

Согласно разработанной схеме требуется:

- добавить поворот налево на пр. Мира с ул. 30 лет Победы при движении со стороны ул. Маяковского;
- внести изменение в светофорное регулирование согласно разработанного режима работы светофорной сигнализации.



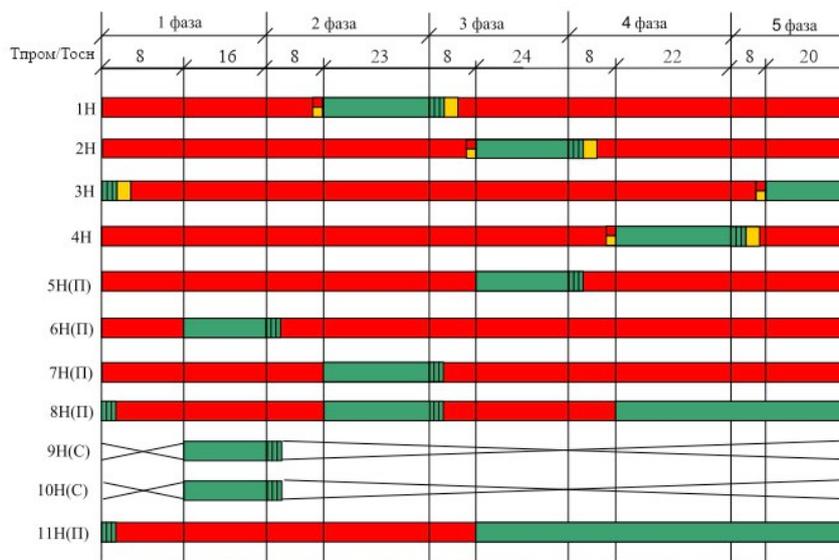
**Рис. 11. Временная диаграмма светофорного цикла второго варианта**  
Примечание: составлено авторами.

Таблица 5

**Параметры светофорного регулирования третьего варианта**

Фаза	Тпром	Тосн
1	8	16
2	8	23
3	8	24
4	8	22
5	8	20
Тцикла = 145 с		

Примечание: составлено авторами.



**Рис. 12. Временная диаграмма светофорного цикла третьего варианта**  
Примечание: составлено авторами.

После внесения изменений в реализованную модель было проведено 30 прогонов измененной модели.

В связи с тем что основной проблемой было отсутствие поворота налево при движении по улице 30 лет Победы в направлении на север-восток, то в качестве альтернативы действующего режима было предложено четыре варианта схем пофазного разъезда и три варианта светофорного регулирования по ним. Эксперименты на модели были проведены для каждой схемы разъезда на перекрестке при разных вариантах светофорного регулирования. Таким образом, исследовалось 12 стратегий.

Для оценки эффективности каждой стратегии использовали следующие показатели эффективности: средняя и максимальная длина затора, количество транспортных средств, прошедших перекресток. Оценивались критерии как для каждого направления движения через перекресток, так и в целом по перекрестку. Параметры пешеходного потока не оценивались, так как было достаточно обеспечить его безопасность.

Для проведения сравнительной оценки сценариев между собой применялась свертка векторного показателя эффективности в скалярный по методу мультипликативному методу по формуле (3) [7, 8]:

$$F(A_i) = \frac{\prod_{i=1}^m f_i^{\alpha_i}(A_i)}{\prod_{i=m+1}^p f_i^{\alpha_i}(A_i)} \quad (3)$$

В числителе находится произведение тех критериев, значение которых следует максимизировать. В нашем случае это один показатель – количество транспортных средств, прошедших перекресток. В знаменателе находятся произведение тех критериев, значение которых надо минимизировать. В данном случае это средняя и максимальная длина затора. В результате получаем новый обобщенный критерий, требующий максимизации.

Средние значения по перекрестку сведены в табл. 6.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе имитационного моделирования исследовалось предположение, что изменение схемы пофазного разъезда транспорта на перекрестке вводом дополнительного направления движения транспорта улучшит качество движения на перекрестке. Для этого составлены и проанализированы схемы пофазного проезда, параметры светофорного регулирования.

Анализ показал, что действующий режим работы светофорного объекта превосходит по всем показателям разработанные режимы, следовательно, их внедрение не целесообразно.

Материалы проведенного исследования могут применяться в образовательных целях для формирования профессиональных компетенций у обучающихся.

Таблица 6

Оценка эффективности организации движения на перекрестке

Режимы работы светофора	Количество транспортных средств, прошедших перекресток	Средняя длина затора	Максимальная длина затора	Обобщенный показатель эффективности (3)
Действующий режим	515	77,67	154,19	2,22
1-й вариант режима	450	92,3	195,4	1,56
2-й вариант режима	475	83,04	177,39	1,82
3-й вариант режима	486	85,12	179,68	1,84

Примечание: составлено авторами.

## Список источников

1. Методические указания по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Использование программных продуктов математического регулирования транспортных потоков при оценке эффективности проектных решений в сфере организации дорожного движения. (согласовано Минтрансом России 13 июля 2017). URL: <https://base.garant.ru/71802758/> (дата обращения: 20.04.2025).
2. Погребняк М. А. Моделирование движения транспортных потоков : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ярославль, 2024. 135 с.
3. Суслов С., Каталевский Д. Применение имитационного моделирования при управлении комплексными проектами. URL: <https://www.anylogic.ru/resources/books/modelling-and-simulation-in-complex-project-management/> (дата обращения: 20.04.2025).
4. Григорьева Д. Н., Фасхутдинова А. Р. Использование средств имитационного моделирования при оптимизации светофорного регулирования // «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2023 : сб. тр. одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, 18–20 октября 2023 г. г. Казань / под науч. ред. В. В. Девяткова. Казань : Изд-во АН РТ, 2023. С. 591–598.
5. Примеры проектов. URL: <https://ptv-traffic.com/projects/> (дата обращения: 20.04.2025).
6. ГОСТ Р 70716-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Дороги автомобильные и улицы. Безопасность движения пешеходов. Общие требования. М. : Российский институт стандартизации, 2023. 42 с.
7. Белов В. В., Лопатин А. К. Оригинальная свертка двух критериев для задачи выбора лучшего варианта // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 8. С. 14–19. <https://doi.org/10.17513/snt.37623>.
8. Ногин В. Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. № 4. С. 73–82.

## Информация об авторах

**Л. Ю. Запеевалова** – кандидат технических

наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0003-3302-9777>,  
zapevalova\_lyu@surgu.ru✉

**С. И. Валуев** – специалист;

<https://orcid.org/0009-0006-6096-8795>,  
pattovn2622@gmail.com

**А. В. Запеевалов** – кандидат технических

наук, доцент;

<https://orcid.org/0009-0007-1313-8913>,  
zapevalov\_av@surgu.ru

## References

1. Guidelines for the development and implementation of measures to organize road traffic. Use of software products for mathematical regulation of traffic flows when assessing the effectiveness of design solutions in the field of road traffic organization. (approved by the Ministry of Transport of the Russian Federation on July 13, 2017). URL: <https://base.garant.ru/71802758/> (accessed: 20.04.2025). (In Russ.).
2. Pogrebnyak M. A. Modelirovanie dvizheniya transportnykh potokov. Cand. Sci. (Physics and Mathematics) Thesis. Yaroslavl; 2024. 135 p. (In Russ.).
3. Suslov S., Katalevsky D. Modeling and simulation in Complex Project Management. URL: <https://www.anylogic.ru/resources/books/modelling-and-simulation-in-complex-project-management/> (accessed: 20.04.2025). (In Russ.).
4. Grigorieva D. N., Faskhutdinova A. R. The use of simulation tools in optimizing traffic light regulation. In: *Proceedings of the 11th All-Russian Research-to-Practice Conference on simulation modeling and its implementation in science and industry "Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriia i praktika (IMMOD-2023)"*, October 18–20, 2023, Kazan. Devyatkov V. V., ed. Kazan: Izd-vo AN RT; 2023. p. 591–598. (In Russ.).
5. Primery proektov. URL: <https://ptv-traffic.com/projects/> (accessed: 20.04.2025). (In Russ.).
6. GOST (State Standard) R 70716-2023. Automobile roads and streets. Traffic safety of pedestrians. General requirements. Moscow: Russian Standartization Institute; 2023. 42 p. (In Russ.).
7. Belov V. V., Lopatin A. K. The original two criteria's convolution for the best option's choosing problem. *Modern High Technologies*. 2019;(8):14–19. <https://doi.org/10.17513/snt.37623>. (In Russ.).
8. Noghin V. D. Weighted sum scalarization in multicriteria optimization. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2014;(4):73–82. (In Russ.).

## About the authors

**L. Yu. Zapevalova** – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;

<https://orcid.org/0000-0003-3302-9777>,  
zapevalova\_lyu@surgu.ru✉

**S. I. Valuev** – Specialist;

<https://orcid.org/0009-0006-6096-8795>,  
pattovn2622@gmail.com

**A. V. Zapevalov** – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;

<https://orcid.org/0009-0007-1313-8913>,  
zapevalov\_av@surgu.ru

Научная статья

УДК 004.315

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-5>



## Анализ сложности арифметических операций в модулярной системе счисления квадратичного диапазона

*Наталья Сергеевна Золотарева*

*Сургутский государственный университет, Сургут, Россия*

**Аннотация.** Исследование посвящено изучению особенностей и эффективности модулярной системы счисления квадратичного диапазона, включая реализацию базовых арифметических операций на серийных (позиционных) компьютерах. Основной целью является проанализировать структуру и особенности выполнения различных арифметических операций в модулярной системе счисления квадратичного диапазона и провести сравнение их временной сложности с аналогичными операциями в традиционных позиционных системах счисления. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: изучение структуры и особенностей модулярной системы счисления квадратичного диапазона, реализация базовых арифметических операций на языке Python, проведение экспериментов и анализ временной сложности операций. Методология исследования включает теоретическое изучение основ модулярной системы счисления квадратичного диапазона, создание алгоритмов выполнения операций на Python, экспериментальное тестирование и анализ результатов. Результатом исследования является создание алгоритма выполнения арифметических операций в модулярной системе счисления квадратичного диапазона, выявление значительного выигрыша в производительности по сравнению с позиционными системами счисления, подтвержденного экспериментально. Таким образом, данное исследование подтверждает перспективность применения модулярной системы счисления для повышения производительности в задачах с высокими требованиями к быстродействию и ресурсоемкости.

**Ключевые слова:** модулярная система, квадратичный диапазон, арифметические операции, временная сложность, позиционные системы, последовательная обработка, позиционные компьютеры

**Для цитирования:** Золотарева Н. С. Анализ сложности арифметических операций в модулярной системе счисления квадратичного диапазона // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 3. С. 44–54. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-5>.

Original article

## Arithmetic operations' complexity analysis in modular arithmetic within quadratic range

*Natalia S. Zolotareva*

*Surgut State University, Surgut, Russia*

**Abstract.** The authors study the features and effectiveness of modular arithmetic within a quadratic range, including the implementation of basic arithmetic operations on commodity computers. The research aim is to analyze the structure and features of performing various arithmetic operations in the modular arithmetic within quadratic range and compare their time complexity with similar operations in traditional positional systems. To meet this objective, the authors investigated the structure and characteristics of modular arithmetic within a quadratic range. They implemented arithmetic operations in Python, performed experiments, and assessed the time complexity of operations. The research methods include a theoretical study of the basis of the modular arithmetic within quadratic range, the creation of algorithms for performing operations in Python, experimental testing and analysis of the results. The research result is the creation of an algorithm for performing arithmetic operations in the modular arithmetic within quadratic range, revealing a significant performance gain

compared to positional number systems, confirmed experimentally. Therefore, this study proves that modular arithmetic can improve task productivity that requires speed and resources.

**Keywords:** modular arithmetic, quadratic range, arithmetic operations, time complexity, positional system, sequential processing, commodity computer

**For citation:** Zolotareva N. S. Arithmetic operations' complexity analysis in modular arithmetic within quadratic range. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(3):44–54. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-5>.

## ВВЕДЕНИЕ

Модулярная система счисления (МСС) квадратичного диапазона представляет собой расширение традиционной модулярной системы счисления (одинарного диапазона). МСС предназначена для работы в больших числовых областях и специфическими алгоритмами обработки чисел. Она является математической моделью для реализации вычислений на цифровых вычислительных устройствах.

К основным компонентам МСС квадратичного диапазона относятся следующие.

1. Совокупность элементов модулярного квадратичного диапазона.

Элементы этой совокупности представляют собой числа, выраженные в виде вычетов по различным основаниям. Эти основания определяют конкретный диапазон значений, внутри которого проводятся операции над числами. Каждое число записывается в виде остатков от деления на некоторые фиксированные основания – модули.

2. Множество операций.

Операции, выполняемые над представленными в МСС данными, делят на два класса: модульные и немодульные. Модульные характеризуются тем, что при их выполнении не происходит переносов между разрядами. Примерами таких операций являются сложение, вычитание и умножение, деление на цело, умножение на обратный элемент и др. К немодульным операциям отнесены деление, расширение, определение знака, сравнение, определение переполнения, масштабирование, определение ошибки, локализация ошибки, вычисление ранга и др. Для выполнения этих операций, в отличие от модульных, требуется оценка значения числа в целом, которая затруднена в связи с непозиционной природой МСС [1, 2].

3. Алгоритмы выполнения операций.

Алгоритмические процедуры предназначены для оптимизации процесса вычислений, минимизации временных затрат и повышения точности результатов.

Вычисления производятся над числами, представленными в типовом машинном формате, который соответствует возможностям конкретного компьютера. Такие числа задаются в виде цифр, соответствующих позициям позиционной системы счисления. Применяется на практике:

– двоичная система, которая используется благодаря простоте аппаратной реализации и эффективности хранения информации;

– шестнадцатеричная система применяется, когда нужна компактность представления больших объемов данных и удобство восприятия человеком.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании основные арифметические операции в МСС реализованы на серийном (позиционном) компьютере.

Серийный компьютер – это вычислительная система классической архитектуры, в которой операнды представлены в позиционной системе счисления (ПСС), а операции выполняются последовательно. Термин «серийный» подчеркивает традиционный подход к обработке данных, в отличие от специализированных систем, таких как модулярные компьютеры.

К основным характеристикам серийных компьютеров можно отнести следующие.

1. Числа представляются в виде последовательности цифр, каждая из которых имеет вес, зависящий от ее позиции (разряда).

2. Последовательная обработка. Операции выполняются последовательно, например, сложение двух чисел выполняется пошагово, начиная с младшего разряда. Сложение, вы-

читание, умножение и деление выполняются с учетом переносов и заимствований.

3. Традиционная архитектура фон Неймана (один центральный процессор выполняет операции последовательно).

Операции в МСС, реализованные на серийном (позиционном) компьютере, сопровождаются рядом трудностей.

1. Преобразование в ПСС. Числа, представленные в МСС, могут быть преобразованы в ПСС с помощью китайской теоремы об остатках (КТО). После преобразования можно выполнять обычные арифметические операции (сложение, вычитание, умножение и т. д.).

2. Обратное преобразование. После выполнения операций в ПСС результат необходимо снова преобразовать в МСС.

Преобразование между системами счисления требует вычислительных ресурсов.

Введем основные понятия и определения для МСС квадратичного диапазона.

В МСС каждое число представляется в виде набора остатков по соответствующим основаниям (модулям), позволяющим эффективно использовать ресурсы оборудования и минимизировать ошибки округления при выполнении сложных расчетов [3].

Стоит отметить, что в статье модули, по которым вычисляются наименьшие неотрицательные вычеты по модулю (остатки от деления), называются в этой тематике основаниями одинарной или квадратичной МСС.

Определение: Модулярная система счисления квадратичного диапазона – это совокупность математических конструкций и правил, предназначенных для представления и обработки чисел с использованием системы взаимно простых модулей, каждый из которых является квадратом простого числа.

Пусть  $p_1, p_2, \dots, p_n$  – простые числа и пусть  $m_i = p_i^2, i = 1, 2, \dots, n$  – соответствующие квадратичные модули. Тогда любое целое число  $X$  в диапазоне  $[0, M - 1]$ , где  $M = m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_n$ , может быть однозначно представлено в виде набора остатков:

$$X = (a_1, a_2, \dots, a_n)(m_1, m_2, \dots, m_n),$$

где  $a_i$  – остаток от деления числа  $X$  на модуль  $m_i$ , то есть  $a_i = X \bmod m_i$ ; пара  $a_1, a_2, \dots, a_n$  называется модулярным представлением числа  $X$ .

Определение: Квадратичный модуль – это модуль, задаваемый в виде квадрата простого числа  $p$ , то есть  $m = p^2$ .

Определение: Диапазон значений – множество чисел, представленных в МСС с квадратичными модулями, ограничено верхним пределом, равным произведению всех модулей.

Китайская теорема об остатках (КТО) – известная в теории чисел. Из теоремы следует: если заданы попарно взаимно простые модули  $m_1, m_2, \dots, m_n$ , то любое число  $Y$  в диапазоне  $[0, M - 1]$ , где  $M = m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_n$ , может быть однозначно представлено своими остатками по этим модулям.

Теорема: Пусть  $m_1, m_2, \dots, m_n$  – попарно взаимно простые числа, то есть  $\text{НОД}(m_i, m_j) = 1$  для всех  $i \neq j$ . Тогда система сравнений:

$$\begin{cases} Y \equiv \alpha_1 \pmod{m_1}, \\ Y \equiv \alpha_2 \pmod{m_2}, \\ \vdots \\ Y \equiv \alpha_n \pmod{m_n}, \end{cases}$$

имеет единственное решение  $Y$  в диапазоне  $[0, M - 1]$ , где  $M = m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_n$ .

Доказательство.

Пусть модули  $m_1, m_2, \dots, m_n$  попарно взаимно просты, то есть  $\text{НОД}(m_i, m_j) = 1$  для всех  $i \neq j$ . Требуется доказать существование и единственность решения  $Y$  в указанном диапазоне.

I. Определим

$$M_i = \frac{M}{m_i}, i = 1, 2, \dots, n.$$

Так как модули попарно взаимно просты, очевидно, что  $M_i$  и  $m_i$  также взаимно просты для каждого  $i$ .

II. Поиск обратных элементов:

Для каждого  $M_i$  найдем обратный элемент  $X_i$  по модулю  $m_i$ , то есть такое число, что:

$$(X_i \cdot M_i) \equiv 1 \pmod{m_i}$$

Обратные элементы можно найти с помощью расширенного алгоритма Евклида.

III. Далее воспользуемся формулой:

$$Y = \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot X_i \cdot M_i) \pmod{M}.$$

Рассмотрим арифметические операции в МСС квадратичного диапазона.

1. Сложение, вычитание и умножение.

Сложение и вычитание в МСС квадратичного диапазона выполняются поэлементно по каждому модулю с последующим вычислением остатка [1, 2, 4, 5]. Пусть заданы два числа  $A = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \dots \cdot \alpha_n$  и  $B = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_n$ , где  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  – остатки по модулям  $m_i = p_i^2$ , а  $p_i$  – простые числа. Тогда:

$$A + B = (\alpha_1 + \beta_1 \pmod{m_1}, \alpha_2 + \beta_2 \pmod{m_2}, \dots, \alpha_n + \beta_n \pmod{m_n}),$$

$$A - B = (\alpha_1 - \beta_1 \pmod{m_1}, \alpha_2 - \beta_2 \pmod{m_2}, \dots, \alpha_n - \beta_n \pmod{m_n}).$$

Умножение также выполняется поэлементно с последующим взятием остатка:

$$A \cdot B = (\alpha_1 \cdot \beta_1 \pmod{m_1}, \alpha_2 \cdot \beta_2 \pmod{m_2}, \dots, \alpha_n \cdot \beta_n \pmod{m_n}).$$

Результаты операций сложения, вычитания и умножения  $A + B$ ,  $A - B$  и  $A \cdot B$  представлены остатками  $\gamma_i$ ,  $\sigma_i$  и  $\delta_i$  по тем же основаниям системы счисления  $m_i$ .

$$A + B = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n),$$

$$A - B = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n),$$

$$A \cdot B = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n),$$

где  $\gamma_i$  сравнимо с  $\alpha_i + \beta_i$  по модулю  $m_i$ ,  $\sigma_i$  сравнимо с  $\alpha_i - \beta_i$  по модулю  $m_i$ ,  $\delta_i$  сравнимо с  $\alpha_i \cdot \beta_i$  по тому же модулю, выполняются соотношения:

$$\gamma_i = \alpha_i + \beta_i \pmod{m_i},$$

$$\sigma_i = \alpha_i - \beta_i \pmod{m_i},$$

$$\delta_i = \alpha_i \cdot \beta_i \pmod{m_i}.$$

Результатом являются числа:

$$\gamma_i = \alpha_i + \beta_i - \left\lfloor \frac{\alpha_i + \beta_i}{m_i} \right\rfloor m_i,$$

$$\sigma_i = \alpha_i - \beta_i - \left\lfloor \frac{\alpha_i - \beta_i}{m_i} \right\rfloor m_i,$$

$$\delta_i = \alpha_i \beta_i - \left\lfloor \frac{\alpha_i \beta_i}{m_i} \right\rfloor m_i.$$

Пример 1. Рассмотрим выполнение данных операций на примере.

В компьютерах, поддерживающих 32-битные числа, типовой диапазон чисел – от 0 до  $2^{32} - 1$ .

Ставится задача – выбрать подходящий набор квадратичных модулей, который покроет этот диапазон, и выполнить операции сложения, вычитания и умножения в МСС.

В качестве оснований выберем взаимно простые числа, квадраты которых дадут достаточное покрытие диапазона:  $m_1 = 17$ , тогда  $p_1 = 17^2 = 289$ ,  $m_2 = 19$ , тогда  $p_2 = 19^2 = 361$ ,  $m_3 = 23$ , тогда  $p_3 = 23^2 = 529$ ,  $m_4 = 29$ , тогда  $p_4 = 29^2 = 841$ ,  $m_5 = 31$ , тогда  $p_5 = 31^2 = 961$ .  $M = 289 \cdot 361 \cdot 529 \cdot 841 \cdot 961 = 44604646326241 > 2^{32} - 1 = 4294967295$ .

Необходимость превышения произведения модулей над машинным диапазоном обусловлена особенностью МСС и требованием полной однозначности представления чисел.

Пусть даны два числа, представленных в МСС:  $A = (23, 87, 12, 34, 56)$  и  $B = (17, 34, 157, 89, 112)$ .

Выполняем поэлементное сложение с последующим взятием остатка по каждому модулю:

$$A + B = (23 + 17 \pmod{289}, 87 + 24 \pmod{361}, 12 + 157 \pmod{529}, 34 + 89 \pmod{841}, 56 + 112 \pmod{961}) = (40 \pmod{289}, 121 \pmod{361}, 169 \pmod{529}, 1239 \pmod{841}, 168 \pmod{961}) = (40, 121, 169, 123, 168).$$

Аналогично выполняем поэлементное вычитание со взятием остатка:

$$A - B = (23 - 17 \pmod{289}, 87 - 24 \pmod{361}, 12 - 157 \pmod{529}, 34 - 89 \pmod{841}, 56 - 112 \pmod{961}) = (6 \pmod{289}, 53 \pmod{361}, 384 \pmod{529}, 786 \pmod{841}, 905 \pmod{961}) = (6, 53, 384, 786, 905).$$

При выполнении операции вычитания в МСС результатом может оказаться отрицательное число. Однако в МСС работают с неотрицательными числами, ограниченными пределами выбранного модуля. Для перевода результата в стандартный вид применяется простая процедура: если число получилось отрицательным, к нему добавляют модуль. Это обусловлено следующими причинами:

1. Периодичность и цикличность.

В МСС действует циклическая арифметика. Если вычитается число и получается отрицательный результат, то это эквивалентно перемещению по кругу на определенное расстояние

влево, и возвращение в положительную зону можно выполнить добавлением модуля.

Периодичность и цикличность в МСС позволяют работать с числами в ограниченном диапазоне, создавая эффект возврата в начало при выходе за пределы. Это важнейшее свойство, лежащее в основе модулярной арифметики и обеспечивающее корректность вычислений.

### 2. Единственное представление.

В МСС каждое число в диапазоне  $[0, M - 1]$  должно иметь единственное представление. Появление отрицательного числа нарушает это правило, поэтому нормализация необходима.

### 3. Последовательность вычислений.

Добавление модуля нормализует результат и восстанавливает нормальное состояние системы, позволяя продолжить вычисления без нарушения законов модулярной арифметики.

На примерах выполним поэлементное умножение с последующим взятием остатка:

$$A \cdot B = (23 \cdot 17 \pmod{289}, 87 \cdot 34 \pmod{361}, 12 \cdot 157 \pmod{529}, 34 \cdot 89 \pmod{841}, 56 \cdot 112 \pmod{961}) = (391 \pmod{289}, 2958 \pmod{361}, 1884 \pmod{529}, 3026 \pmod{841}, 6272 \pmod{961}) = (102, 70, 297, 503, 506).$$

### 2. Возведение в степень.

Возведение в степень в МСС квадратичного диапазона выполняется поэлементно с последующим взятием остатка по каждому модулю.

Пусть  $A = (23, 87, 12, 34, 56)$  и  $k = 5$ . Необходимо найти  $A^k$ .

Для каждого модуля  $m_i$  возводим соответствующую компоненту числа  $A$  в степень  $k$  и берем остаток по модулю  $m_i$ .

$$A^5 = (23^5 \pmod{289}, 87^5 \pmod{361}, 12^5 \pmod{529}, 34^5 \pmod{841}, 56^5 \pmod{961}) = (6436343 \pmod{289}, 4984209207 \pmod{361}, 248832 \pmod{529}, 45435424 \pmod{841}, 550731776 \pmod{961}) = (24, 254, 202, 399, 935).$$

### 3. Нахождение обратного элемента.

Нахождение обратного числа в МСС квадратичного диапазона выполняется поэлементно с использованием расширенного алгоритма Евклида. Это позволяет эффективно обрабатывать числа и выполнять обратные операции в МСС.

Определение: Обратное число  $A^{-1}$  по модулю  $m_i$  – это такое число, что:  $A^{-1} \cdot A \equiv 1 \pmod{m_i}$ .

Для каждого модуля  $m_i$  находится обратный элемент  $X_i$  для соответствующей компоненты числа  $A$  по модулю  $m_i$ . Будем использовать расширенный алгоритм Евклида для поиска обратных элементов. Рассмотрим его подробно.

Требуется найти обратный элемент  $Y$  для числа  $A$  по модулю  $m$ , то есть такое число  $Y$ , что:

$$A \cdot X \equiv 1 \pmod{m}.$$

Расширенный алгоритм Евклида основан на классическом алгоритме Евклида для нахождения наибольшего общего делителя (НОД), дополненным поиском коэффициентов Безу.

### Алгоритм

#### I. Начальные условия.

Пусть  $A$  и  $m$  – заданные числа, причем  $\text{НОД}(A, m) = 1$  (условие взаимной простоты). Введем начальные значения:  $x_0 = 1, x_1 = 0, y_0 = 0, y_1 = 1$ .

#### II. Основной цикл.

Пока  $m \neq 0$ , делаем следующие шаги:

$$q = \frac{A}{m}, \quad r = A \pmod{m}, \quad A = m, \quad m = r.$$

Обновляем коэффициенты:

$$(x_0, x_1) = (x_1, x_0 - q \cdot x_1), (y_0, y_1) = (y_1, y_0 - q \cdot y_1).$$

#### III. Завершение цикла.

Когда  $m = 0$ , последний ненулевой остаток  $A$  – это НОД. Если  $A = 1$ , то обратный элемент найден и равен  $x_0$ .

Пример 2. Пусть  $A = (23, 87, 12, 34, 56)$ . Необходимо найти  $A^{-1}$ .

Найдем обратный элемент для  $A = 23$  по модулю  $m = 289$ .

#### I. Начальные условия:

$$A = 23, \quad m = 289, \quad x_0 = 1, \quad x_1 = 0, \quad y_0 = 0, \quad y_1 = 1.$$

#### II. Основной цикл.

Первый шаг:

$$q = \frac{23}{289} = 0, \quad r = 23 \pmod{289} = 23.$$

Обновляем коэффициенты:

$$A = 289, \quad m = 23, \quad x_0 = 0, \quad x_1 = 1, \quad y_0 = 1, \quad y_1 = 0.$$

Второй шаг:

$$q = \frac{289}{23} = 12, \quad r = 289 \pmod{23} = 13.$$

Обновляем коэффициенты:

$$A = 23, \quad m = 13, \quad x_0 = 1, \quad x_1 = -12, \quad y_0 = 0, \quad y_1 = 1.$$

Третий шаг:

$$q = \frac{23}{13} = 1, r = 23 \pmod{13} = 10.$$

Обновляем коэффициенты:

$$A = 13, m = 10, x_0 = -12, x_1 = 13, y_0 = 1, y_1 = -1.$$

Четвертый шаг:

$$q = \frac{13}{10} = 1, r = 13 \pmod{10} = 3.$$

Обновляем коэффициенты:

$$A = 10, m = 3, x_0 = 13, x_1 = -25, y_0 = -1, y_1 = 2.$$

Пятый шаг:

$$q = \frac{10}{3} = 3, r = 10 \pmod{3} = 1.$$

Обновляем коэффициенты:

$$A = 3, m = 1, x_0 = -25, x_1 = 88, y_0 = -2, y_1 = 7.$$

Последний шаг:

$$q = \frac{3}{1} = 3, r = 3 \pmod{1} = 0.$$

Обновляем коэффициенты:

$$A = 1, m = 0, x_0 = 88, x_1 = -299, y_0 = -7, y_1 = 23.$$

III. Завершение.

Последний ненулевой остаток  $A = 1$ , следовательно, обратный элемент равен  $x_0 = 88$ .

Расширенный алгоритм Евклида позволил найти обратный элемент к числу 23 по модулю 289, он равен 88.

Чтобы проверить результат, подставим его в исходное уравнение:

$$A \cdot X \equiv 1 \pmod{m}$$

$$23 \cdot 88 \equiv 1 \pmod{289}$$

Вычислим левую сторону:  $23 \cdot 88 = 2024$ .

Теперь возьмем остаток от деления на 289:  $2024 \pmod{289} = 1$ .

Таким образом, уравнение выполняется, и 88 действительно является обратным элементом к 23 по модулю 289.

Аналогично, найдем обратные элементы для остальных компонент числа  $A = (23, 87, 12, 34, 56)$  по остальным модулям  $p_2 = 361, p_3 = 529, p_4 = 841, p_5 = 961$ . Используя расширенный алгоритм Евклида для каждого модуля отдельно, получим:

$$87 \cdot 83 \equiv 1 \pmod{361}$$

$$12 \cdot 485 \equiv 1 \pmod{529}$$

$$34 \cdot 470 \equiv 1 \pmod{841}$$

$$56 \cdot 532 \equiv 1 \pmod{961}$$

Обратное число для  $A = (23, 87, 12, 34, 56)$  по модулям  $p_1 = 289, p_2 = 361, p_3 = 529, p_4 = 841, p_5 = 961$  соответственно:  $A^{-1} = (88, 83, 485, 470, 532)$ .

Рассмотрим отдельно случай для компоненты  $a_5 = 56$  числа  $A$ , по модулю  $p_5 = 961$ . Расширенный алгоритм Евклида позволил нам найти, что обратный элемент к числу 56 по модулю 961 равен  $-429$ . Однако в модулярной арифметике результат должен находиться в диапазоне от  $[0, p_5 - 1]$ . В нашем случае модуль равен 961.

Чтобы привести результат к нужному диапазону, мы добавляем модуль к отрицательному числу:

$$-429 + 961 = 532.$$

Таким образом,  $-429$  эквивалентно 532 по модулю 961.

Нормализация отрицательного результата путем добавления модуля – это стандартная практика в модулярной арифметике, позволяющая приводить результаты к корректному диапазону.

#### 4. Конвертирование в ПСС.

Для перевода числа из МСС в ПСС используется КТО. Она позволяет построить число  $Y$  в ПСС, исходя из остатков по каждому модулю.

Пример 3. Пусть задано число в МСС в виде остатков  $A = (23, 87, 12)$ , модули  $m_1 = 49, m_2 = 121, m_3 = 169$ .

1) Находим произведение модулей:

$$M = 49 \cdot 121 \cdot 169 = 1002001.$$

2) Вычислим:

$$M_1 = \frac{M}{m_1} = \frac{1002001}{49} = 20449,$$

$$M_2 = \frac{M}{m_2} = \frac{1002001}{121} = 8281,$$

$$M_3 = \frac{M}{m_3} = \frac{1002001}{169} = 5929.$$

3) Используя расширенный алгоритм Евклида, находим обратные элементы.

Найдем обратный элемент  $X_1$  для  $M_1$  по модулю  $m_1 = 49$ :

$X_1 = 46$ , так как  $46 \cdot 20449 \equiv 1 \pmod{49}$ .

Найдем обратный элемент  $X_2$  для  $M_2$  по модулю  $m_2 = 121$ :

$X_2 = 16$ , так как  $16 \cdot 8281 \equiv 1 \pmod{121}$ .

Найдем обратный элемент  $X_3$  для  $M_3$  по модулю  $m_3 = 169$ :

$X_3 = 157$ , так как  $157 \cdot 5929 \equiv 1 \pmod{169}$ .

4) Собираем результат:

$Y = (23 \cdot 46 \cdot 20449 + 87 \cdot 16 \cdot 8281 + 12 \cdot 157 \cdot 5929) \pmod{1002001} = 44332430 \pmod{1002001} = 244386$ .

Таким образом, число  $A = (23, 87, 12)$  в позиционной системе равно 244386.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На языке программирования Python разработаны программы выполнения рассмотренных операций. Приведены фрагменты алгоритмов и результаты (рис. 1–4).

Исходные данные: в МСС квадратичного диапазона представлены числа  $A = (23, 87, 12, 34, 56)$  и  $B = (17, 34, 157, 89, 112)$ . Модуляр-

ные основания  $m_1 = 17$ , тогда  $p_1 = 17^2 = 289$ ,  $m_2 = 19$ , тогда  $p_2 = 19^2 = 361$ ,  $m_3 = 23$ , тогда  $p_3 = 23^2 = 529$ ,  $m_4 = 29$ , тогда  $p_4 = 29^2 = 841$ ,  $m_5 = 31$ , тогда  $p_5 = 31^2 = 961$ .

Анализ сложности операций в МСС квадратичного диапазона позволяет оценить ресурсы, необходимые для выполнения операций, и служит важным фактором при выборе подходящей методики и оптимизации производительности [6–8].

Оценка сложности алгоритмов – это мера количества ресурсов времени, необходимого для выполнения алгоритма в зависимости от размера входных данных. Сложность позволяет сравнить алгоритмы и выбрать наиболее эффективный.

Обычно сложность оценивается в следующих терминах. Временная сложность – сколько времени займет выполнение алгоритма и пространственная сложность – сколько памяти потребуется для выполнения алгоритма. Чаще всего рассматривают временную слож-

```
from sympy.ntheory.modular import solve_congruence
from sympy.ntheory import isprime
from sympy.ntheory.primetest import mr
from functools import reduce
from operator import mul
```

Рис. 1. Импорт необходимых библиотек

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

```
# Вспомогательные функции
def modular_inverse(a, m):
    """Расширенный алгоритм Евклида для нахождения обратного элемента."""
    t, new_t = 0, 1
    r, new_r = m, a
    while new_r != 0:
        quotient = r // new_r
        t, new_t = new_t, t - quotient * new_t
        r, new_r = new_r, r - quotient * new_r
    if r > 1:
        return None # Нет обратного элемента
    if t < 0:
        t += m
    return t

def convert_to_positional(remns, mods):
    """Перевод из модулярной системы счисления в позиционную."""
    return solve_congruence(*zip(remns, mods))[0]
```

Рис. 2. Вспомогательные функции

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

```

# Данные
A = (23, 87, 12)
moduli_msc = (49, 121, 169)

# Другие данные для операций
A_full = (23, 87, 12, 34, 56)
B_full = (17, 34, 157, 89, 112)
moduli_full = (289, 361, 529, 841, 961)

# 1. Сложение
addition_result = tuple((a + b) % m for a, b, m in zip(A_full, B_full, moduli_full))
print("Сложение:", addition_result)

# 2. Вычитание
subtraction_result = tuple((a - b) % m for a, b, m in zip(A_full, B_full, moduli_full))
print("Вычитание:", subtraction_result)

# 3. Умножение
multiplication_result = tuple((a * b) % m for a, b, m in zip(A_full, B_full, moduli_full))
print("Умножение:", multiplication_result)

# 4. Возведение в степень
power_result = tuple(pow(a, 5, m) for a, m in zip(A_full, moduli_full))
print("Возведение в степень:", power_result)

# 5. Нахождение обратного элемента
inverses = [modular_inverse(a, m) for a, m in zip(A_full, moduli_full)]
print("Обратные элементы:", inverses)

# 6. Конвертирование из модулярной системы в позиционную
positional_A = convert_to_positional(A, moduli_msc)
print("Перевод из модулярной системы в позиционную:", positional_A)

```

Рис. 3. Основная программа

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

```

Сложение: (40, 121, 169, 123, 168)
Вычитание: (6, 53, 384, 786, 905)
Умножение: (102, 70, 297, 503, 506)
Возведение в степень: (24, 254, 202, 399, 935)
Обратные элементы: [88, 83, 485, 470, 532]
Перевод из модулярной системы в позиционную: 244386

```

Рис. 4. Результат

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

ность, так как она отражает скорость выполнения.

Проведем анализ сложности операций сложения, вычитания, умножения, возведения в степень и нахождения обратного элемента.

1. Сложение и вычитание. В МСС квадратичного диапазона обе операции выполняются поэлементно по каждому модулю с последующим взятием остатка. Память требуется пропорционально размеру входных данных.

Временная сложность операции сложения:  $O(n)$ , где  $n$  – количество модулей.

В ПСС сложность данных операций напрямую зависит от размера чисел, участвующих в расчетах. Операции занимают время порядка  $O(n)$ , где  $n$  – количество цифр в числе (базисная единица измерения сложности).

2. Умножение. В МСС квадратичного диапазона операция умножения также выполняется поэлементно с последующим взятием остатка.

Временная сложность операции сложения:  $O(n)$ , где  $n$  – количество модулей.

Для сравнения в позиционной системе счисления (ПСС) сложность следующая:

– классический метод: сложность  $O(n^2)$ , где  $n$  – количество цифр в числе.

– быстрый метод (Карацуба): сложность  $O(n^{\log_2 3})$ .

– самый быстрый известный метод (FFT): сложность  $O(n \log n)$  где  $n$  – размер входных данных.

В ПСС при умножении двух чисел длиной  $n$  цифр нужно выполнить  $n^2$  операций сложения и переноса, что и приводит к квадратичной сложности.

В МСС квадратичного диапазона же каждое умножение выполняется отдельно по каждому модулю, что существенно снижается до линейной сложности.

3. Возведение в степень. Используется быстрый алгоритм Binary Exponentiation, который снижает сложность возведения в степень до  $O(\log k)$ , где  $k$  – показатель степени. Однако, поскольку эта операция выполняется для каждого модуля, общая временная сложность составит  $O(n \cdot \log k)$ .

В ПСС операция возведения числа в степень имеет следующую сложность.

Простой метод: сложность  $O(n^k)$ , где  $n$  – количество цифр,  $k$  – показатель степени.

Быстрый метод (Binary Exponentiation): сложность  $O(n \cdot \log k)$ .

В ПСС возведение в степень приводит к росту числа разрядов, что требует больших ресурсов для обработки.

4. Нахождение обратного элемента. Используется расширенный алгоритм Евклида, который требует  $O(n \cdot \log M)$  операций, где

$M$  – максимальный модуль. Учитывая, что мы выполняем эту операцию для каждого модуля, общая временная сложность составит  $O(n \cdot \log M)$ .

Таблица показывает временную сложность арифметических операций для одинарной и квадратичной, а также позиционной систем счисления. Все они используются для отображения чисел из одинаковых числовых диапазонов. Обозначения в МСС:  $n$  – количество модулей,  $k$  – показатель степени,  $M$  – максимальный модуль; в ПСС:  $n$  – размер входных данных (количество цифр в числе),  $k$  – показатель степени.

Из таблицы можно заметить, что сложность арифметических операций для одинарной и квадратичной МСС одинаковая. Причина заключается в том, что фундаментальная структура операций в обеих системах идентична и ключевым параметром является не сама величина модулей, а их количество. Количество шагов остается постоянным, и разница проявляется лишь в максимальном диапазоне представлений чисел, но не в самой процедуре вычислений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование посвящено анализу модулярной системы счисления квадратичного диапазона, ее структуре и особенностям выполнения основных арифметических операций на серийных (позиционных) компьютерах. Оцениваются временные затраты на выполнение основных арифметических опера-

Таблица

Временная сложность выполнения арифметических операций

Система счисления	Основные арифметические операции				
	Сложение	Вычитание	Умножение	Возведение в степень	Нахождение обратного элемента
Позиционная система счисления	$O(n)$	$O(n)$	$O(n^2)$ $O(n^{\log_2 3})$ $O(n \cdot \log n)$	$O(n^k)$ $O(n \cdot \log k)$	$O(n^2)$
МСС одинарного диапазона	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$	$O(n \cdot \log k)$	$O(n \cdot \log M)$
МСС квадратичного диапазона	$O(n)$	$O(n)$	$O(n)$	$O(n \cdot \log k)$	$O(n \cdot \log M)$

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

ций в сравнении с позиционными системами счисления. На языке программирования Python разработан алгоритм выполнения основных арифметических операций, приведены результаты его работы.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Рассмотренные в исследовании арифметические операции характеризуются низкой сложностью и высокой эффективностью. Большинство операций линейны относительно количества модулей, что обеспечивает быструю обработку данных. Как видно из таблицы, это операции сложения, вычитания и умножения. Линейные операции  $O(n)$  масштабируются линейно с ростом количества модулей, что делает их очень эффективными и быстрыми даже при большом количестве модулей. К логарифмическим операциям относятся возведение в степень и нахождение обратного элемента. Операция возведения в степень  $O(n \cdot \log k)$  эффективна при умеренных показателях степени, но при очень больших степенях может замедляться. Нахождение обратного элемента  $O(n \cdot \log M)$  также может замедляться при росте максимального модуля, но в целом остается достаточно эффективной для большинства практических задач.

Большинство операций в МСС квадратичного диапазона имеют низкую сложность и обеспечивают высокую производительность. Линейные операции особенно привлекательны для крупномасштабных вычислений, тогда как операции с логарифмической зависимостью требуют внимания к размерам показателей степени и модулей.

2. Моделирование МСС квадратичного диапазона на серийных компьютерах имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам можно отнести универсальность

и простоту реализации. Серийные компьютеры могут выполнять широкий спектр задач, используя стандартные алгоритмы и архитектуры.

К недостаткам реализации МСС квадратичного диапазона на серийном компьютере можно отнести следующие:

– медленная обработка – преобразование между системами счисления требует значительных вычислительных ресурсов. Операции в ПСС выполняются последовательно, что снижает производительность;

– большой объем данных – представление чисел в МСС может потребовать больших объемов памяти для хранения промежуточных результатов;

– ограниченные возможности параллельной обработки – серийные компьютеры не приспособлены для параллельной обработки данных, что делает их менее эффективными для массовых вычислений.

Серийные компьютеры широко используются в жизни и науке. Они универсальны, что делает их популярными в различных областях, от персональных компьютеров до серверов и суперкомпьютеров.

Альтернативой серийным компьютерам являются специализированные многопроцессорные (модулярные) компьютеры.

Специализированные многопроцессорные компьютеры, работающие с МСС, специально разработаны для параллельной обработки данных. Они позволяют эффективно выполнять операции в МСС, распределяя нагрузку между процессорами и используя преимущества параллельных вычислений. Целесообразно рассмотреть сложность выполнения операций в специализированных многопроцессорных компьютерах, которые разработаны для работы с МСС и обеспечивают высокую производительность.

### Список источников

1. Акушский И. Я., Юдицкий Д. И. Машинная арифметика в остаточных классах. М. : Советское радио, 1968. 440 с.
2. Амербаев В. М. Теоретические основы машинной арифметики. Алма-Ата : Наука, 1976. 320 с.

### References

1. Akushsky I. Ya., Yuditsky D. I. Mashinnaya arifmetika v ostatochnykh klassakh. Moscow: Sovetskoye radio; 1968. 440 p. (In Russ.).
2. Amerbaev V. M. Teoreticheskie osnovy mashinnoy arifmetiki. Alma-Ata: Nauka; 1976, 320 p. (In Russ.).

3. Червяков Н. И., Коляда А. А., Ляхов П. А. и др. Модулярная арифметика и ее приложения в инфокоммуникационных технологиях : моногр. М. : Физматлит, 2017. 400 с.
4. Инютин С. А. Модулярная алгоритмика многоурядных вычислений. М. : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. 160 с.
5. Золотарева Н. С. Обзор методов и оценка сложности алгоритмов операций сравнения в модулярной арифметике и перевода из модулярной системы в позиционную систему счисления // *Вестник кибернетики*. 2022. № 4. С. 77–90. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-4-77-90>.
6. Инютин С. А. Дробно-рациональные конструкции в компьютерной модулярной арифметике // *Информационные технологии*. 2019. Т. 25, № 9. С. 515–521.
7. Инютин С. А. Метод вычисления позиционных характеристик модулярного представления с линейной сложностью // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2024. Вып. 1. С. 109–122. <https://doi.org/10.14357/20718632240111>.
8. Инютин С. А. Комплексование систем счисления для многоурядных вычислительных процессов // *Информационные технологии*. 2018. Т. 24, № 12. С. 782–790. <https://doi.org/10.17587/it.24.782-790>.
3. Chervyakov N. I., Kolyada A. A., Lyakhov P. A. et al. *Modulyarnaya arifmetika i ee prilozheniya v infokommunikatsionnykh tekhnologiyakh*. Monograph. Moscow: Fizmatlit; 2017. 400 p. (In Russ.).
4. Inyutin S. A. *Modulyarnaya algoritmiika mnogorazryadnykh vychislenii*. Moscow: Izd-vo MAI; 2020. 160 p. (In Russ.).
5. Zolotareva N. S. Methods review and complexity estimation of the algorithms for comparison operations in modular arithmetic and transfer operations from a modular number system to a positional number system. *Proceedings in Cybernetics*. 2022;(4):77–90. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-4-77-90>. (In Russ.).
6. Inyutin S. A. Fraction-rational constructions in computer modular arithmetic. *Information Technologies*. 2019;25(9):515–521. (In Russ.).
7. Inyutin S. A. A method for calculating the positional characteristics of a modular representation with linear complexity. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2024;(1):109–122. <https://doi.org/10.14357/20718632240111>. (In Russ.).
8. Inyutin S. A. The aggregation of number systems for multi-digit computational processes. *Information Technologies*. 2018;24(12):782–790. <https://doi.org/10.17587/it.24.782-790>. (In Russ.).

#### **Информация об авторе**

**Н. С. Золотарева** – аспирант;  
<https://orcid.org/0000-0001-9751-4232>,  
[zolotareva\\_ns@surgu.ru](mailto:zolotareva_ns@surgu.ru)

#### **About the author**

**N. S. Zolotareva** – Postgraduate;  
<https://orcid.org/0000-0001-9751-4232>,  
[zolotareva\\_ns@surgu.ru](mailto:zolotareva_ns@surgu.ru)

Научная статья

УДК 656.7.052.4

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-6>



## Методика расчета балльных оценок за технику пилотирования по результатам записей бортовых регистраторов

**Виктор Владимирович Кашковский<sup>1</sup>, Владимир Валентинович Устинов<sup>2</sup>**✉

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, Иркутск, Россия

**Аннотация.** В работе обоснованы новые подходы и разработаны методика, алгоритмическое и программное обеспечение оценки качества техники пилотирования. Целью данной работы является снижение трудозатрат на обработку полетной информации, исключение субъективизма и повышение достоверности оценивания качества техники пилотирования. В работе проведен анализ существующих методик оценки качества техники пилотирования, показаны их недостатки и обоснованы достоинства предлагаемых решений. Авторами предложены два основных подхода к разработкам методик оценки техники пилотирования для разных групп пилотов с разными первоначальными навыками пилотирования. В основе предложенной концепции оценки качества пилотирования лежит то, что в координированном посадочном маневре полетные параметры коррелированы между собой. Практика показала, что предложенные методики объективно и достоверно выявляют полеты с отклонениями параметров от допусков, позволяют определить полеты с ошибками в технике пилотирования и исключить выпуск в очередной полет неподготовленного летчика. Разработаны программные комплексы, позволяющие провести обработку полученной статистики и автоматизировать процессы оценивания качества техники пилотирования для построения оптимальных программ летной подготовки. Предложенные решения могут быть реализованы в качестве отдельных программных модулей для наземных устройств обработки полетной информации и внедрены в эксплуатацию.

**Ключевые слова:** безопасность полетов, статистика, техника пилотирования, натренированность, программы подготовки, критерии оценивания, планирование летной подготовки

**Для цитирования:** Кашковский В. В., Устинов В. В. Методика расчета балльных оценок за технику пилотирования по результатам записей бортовых регистраторов // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 3. С. 55–62. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-6>.

Original article

### Assessment methods for scores of flight technique based on flight recorders records

**Viktor V. Kashkovsky<sup>1</sup>, Vladimir V. Ustinov<sup>2</sup>**✉

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The paper presents alternative approaches and develops a methodology, algorithm and software for assessing the flight technique. This study's aim is to improve flight technique assessment quality, reduce workload, and exclude subjectivity. The paper analyzes existing assessment methods for flight technique, reveals their disadvantages and substantiates the advantages of the proposed solutions. Authors propose two major approaches to the development of flight technique assessment for pilots with different initial pilot skills. The basis of the proposed flight technique assessment lies in coordinated landing maneuver flight parameters that correlate. Practice proved that the proposed assessment methods objectively and reliably identify flights with deviations from parameters, flights with errors in flight technique and prevent

sending of an untrained pilot on the flight. Developed software suite enables statistics processing and automates the processes for flight technique assessment to build optimal programs of flight training. The proposed solutions can be implemented as separate software modules for ground-based flight data processing devices and put into practice.

**Keywords:** flight safety, statistics, flight technique, proficiency, training programs, evaluation criteria, flight training planning

**For citation:** Kashkovsky V. V., Ustinov V. V. Assessment methods for scores of flight technique based on flight recorders records. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(3):55–62. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-6>.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее важных и сложных задач является подготовка летного состава. От решения этой задачи напрямую зависит безопасность полетов. Непрерывное повышение квалификации летного персонала поможет предупредить и исключить появления ошибок в технике пилотирования, предотвратить допуск к выполнению очередного полетного задания неподготовленного пилота, построить объективные и оптимальные планы подготовок. Каждый педагог и пилот-инструктор оценивает качество выполнения полета по-своему. Из этого следует, что оценка не всегда является точной и объективной. Чтобы прийти к единому принципу оценивания и исключить вероятности завышения и занижения оценок, целесообразным решением является автоматизация этого процесса с применением комплексного показателя качества техники пилотирования при выполнении заданного программы летной подготовки, упражнения.

Большинство существующих методик основаны на сравнении текущих значений параметров оценивания с допустимыми значениями. Однако в настоящее время данную функцию выполняют наземные устройства обработки полетной информации (НУОПИ), в которых выход за летное ограничение предусмотрен при экспресс анализе записей бортовых регистраторов [1, 2, 3].

Наиболее близким решением по данной теме является методика параметрического мониторинга полета, которая проводится при использовании модуля Экспертной Системы Комплексной Оценки Реальных Тенденций Техники Пилотирования (ЭСКОРТ ТП) [4, 5].

По идее авторов статьи, «оптимальный полет» представляет собой 20–30 контролируемых эталонных точек по всему профилю полета. Самым сложным в оценке качества пилотирования является выбор повторяющихся по множеству полетов этапов, на которых самолет пилотируется в ручном режиме, а именно участок захода на посадку. Данные соображения позволяют сделать вывод о том, что идея оптимального полета из 20–30 контролируемых эталонных точек «по всему профилю полета» представляется непродуктивной.

В работе предложены для реализации комплексные показатели оценки качества техники пилотирования по отклонениям значений параметров от эталонов с учетом значимостей параметров оценивания и их корреляционной зависимости, что позволит исключить субъективизм оценивания, повысить достоверность результатов оценивания и безопасность полетов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Авторы предлагают принципиально новый подход к оценке качества пилотирования. Предполагается, что параметры полета в контрольных точках квалифицированно выполненного посадочного маневра коррелированы между собой. При этом возможны различные варианты методик для оценивания этой корреляционной зависимости, охватывающие разные аспекты оценки качества пилотирования.

На первом этапе исследований была реализована опытная методика оценивания качества пилотирования при выполнении предпосадочного маневра среднемагистрального воздушного судна (ВС). Опытная методика

позволяет оценить качество пилотирования как для посадочного маневра в целом, так и для его отдельных этапов [6, 7, 8]. Цель методики – доказательство адекватности предложенных модели пилотирования ВС и концепции оценки качества пилотирования, а также отработка алгоритмов программного обеспечения (ПО).

Методика предполагает, что по данным бортовых устройств регистрации в каждом полете автоматически выявляются контрольные точки. Параметры, измеренные в контрольных точках, образуют вектор измерения значений параметров. Множество реализаций посадочного маневра образуют прямоугольную матрицу наблюдения  $M$ , размерностью  $r \times n$ , каждой строкой которой является вектор измерения значений параметров в конкретном полете.

Квадрат центрированного нормированного вектора изменений имеет вид:

$$A_j = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n), \quad j = \overline{1, r}, \quad (1)$$

где  $a_i = \frac{(x_i - m_i)^2}{D_i}$ ,  $i = \overline{1, n}$  – квадрат центрированного нормированного измерения  $x_i$ ;

$r$  – число строк в матрице  $M$ ;

$j$  – номер строки в матрице  $M$ ;

$n$  – размерность вектора  $A_j$ , в опытной методике  $n = 12$ ;

$m_i$  – оценка среднего значения параметра  $x_i$  по строкам матрицы  $M$ ;

$D_i$  – оценка дисперсии параметра  $x_i$  по строкам матрицы  $M$ .

Расчет текущего показателя качества предлагается рассчитывать по выражению

$$\tilde{g} = AK A^T, \quad (2)$$

где  $A^T$  – вектор столбец, полученный транспонированием текущего вектора измерений  $A$ ;

$K$  – матрица весовых коэффициентов размерностью  $n \times n$ .

Матрица  $K$  получена на основе корреляционной матрицы векторов  $A_j$  матрицы  $M$ .

Для оценки  $\tilde{g}$  характерно то, что она нелинейная в четвертой степени и является разнородностью эксцесса. Эксцесс очень чувстви-

телен к предельным выбросам случайной величины и, следовательно, позволяет характеризовать отклонение данного полета от эталонной модели. Исходя из этого для балльной оценки качества пилотирования были предложены эталонные модели  $g_5$ ,  $g_4$  и  $g_3$ .

Эталонная модель  $g_5$  была получена из выражения (2) при условии, что в векторе  $A$   $a_i = \sigma$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Соответственно модель  $g_4$  получена при условии, что  $a_i = 2\sigma$ ,  $i = \overline{1, n}$ , а модель  $g_3$  – при условии, что  $a_i = 3\sigma$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Значение коэффициента  $\sigma$  было найдено эмпирически. Если в текущем полете  $\tilde{g} < g_5$ , то оценка за полет 5 баллов.

Если  $g_5 < \tilde{g} \leq g_4$ , то оценка за полет 4 балла.

Если  $g_4 < \tilde{g} \leq g_3$ , то оценка за полет 3 балла.

Если  $\tilde{g} > g_3$ , то оценка за полет «неудовлетворительно».

Для опытной методики было разработано ПО, с помощью которого было обработано 186 полетов среднемагистрального самолета. Эксплуатация этого ПО доказала перспективность предложенной концепции и эффективность разработанных алгоритмов обработки.

Для упрощения алгоритмов ПО опытной методики в ней было сделано допущение о том, что плотности распределения измеряемых параметров являются симметричными. Кроме того, число измеряемых параметров в опытной методике было явно недостаточно. Поэтому, основываясь на результатах, полученных с помощью опытного ПО, данная методика была усовершенствована. На ее основе были разработаны взаимно дополняющие друг друга критерии оценки качества пилотирования  $E$ ,  $K$  и  $M$ . Критерии  $E$  и  $K$  получены на основе выражения (2). В данной работе рассмотрим методику оценки качества пилотирования по критерию  $M$ .

При оценке качества пилотирования по критерию  $M$  в выражении (1) было изменено понятие центрированного нормализованного значения  $a_i$ :

$$a_i = \frac{9(x_i - m_i)^2}{\Delta x_i^2}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где  $\Delta x_i^2$  – предельное отклонение  $i$ -го параметра, найденное по матрице  $M$ ;

$m_i$  – медиана  $x_i$  параметра, найденная по матрице  $M$ .

Все измерения в векторе  $A$  в той или иной степени асимметричны. Поэтому величина  $\Delta x_i^2$  для отрицательных и положительных отклонений текущего значения параметра  $x_i$  будет разной. При оценке качества пилотирования по критерию  $M$  размерность вектора  $n = 25$ . Величина  $\Delta x_i^2 / 3$  в выражении (3) необходима для обеспечения четырехбалльной градации оценок.

Для оценки качества пилотирования обозначим элемент вероятности, характеризующий качество пилотирования в текущем полете:

$$r_{ij} = \frac{9(x_i - m_i)(x_j - m_j)}{\Delta x_i \Delta x_j}. \quad (4)$$

Матрица  $M$  позволяет найти выборки  $R_{ij}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, n}$ ,  $i \neq j$ . С учетом того что  $r_{ij} = r_{ji}$  и  $n = 25$ , а также других принятых ограничений каждый полет дает по 276 элементов вероятности (4). Из них в алгоритме оценивания качества пилотирования непосредственно участвуют 12. Остальные могут быть использованы при углубленном анализе качества пилотирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим результаты оценки качества пилотирования, полученные с помощью опытной методики и ПО на его основе. На рис. 1 показаны градации значений  $\tilde{g}$  по моделям  $g_5$ ,  $g_4$  и  $g_3$ . Модели  $g_5$ ,  $g_4$  и  $g_3$  получены при обработке 186 полетов.

В таблице представлены примеры результатов оценивания по данным бортового устройства регистрации параметров критерия

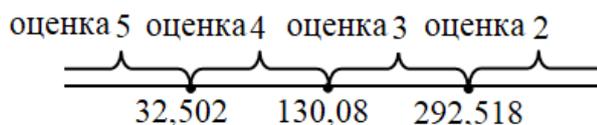


Рис. 1. Балльные оценки, заданные величиной относительных отклонений  
 Примечание: составлено авторами.

$\tilde{g}$  для нескольких полетов среднемагистрального самолета.

Также авторами были проведены исследования по оценке качества выполнения предпосадочного маневра ВС по отдельным этапам, определяющимся изменением параметров оценивания между характерными точками выполнения предпосадочного маневра (замерами относительных отклонений параметров, например превышение скорости полета во второй точке траектории выполнения маневра, относительно первой и т.д.). Алгоритм и критерий оценивания аналогичен изложенному выше.

Данный подход позволяет определить, на каком конкретном участке выполнения маневра летчик получил определенную балльную оценку, и проанализировать его управляющие действия путем просмотра сигналограммы записей параметров полета и управления ВС на данном этапе при обработке этой информации на наземных программных комплексах [7, 9].

На рис. 2 показан один из примеров записей параметров полета и управляющих действий пилота по сигналограмме.

При анализе качества выполнения предпосадочного маневра ВС по полету, получившему неудовлетворительную оценку, по записям параметров, определенных на сигналограмме, очевидно, что пилот на отдельных этапах резко изменял положение руля высоты, что привело к изменениям значений параметров оценивания. Таким образом, инструктор, проводящий разбор качества выполнения полетного задания, может определить конкретные ошибки в технике пилотирования на каждом этапе выполнения любого маневра, входящего в выполнение полетного задания.

Таблица

Балльные оценки за технику пилотирования

Номер реализации (строки) в матрице $M$	$\tilde{g}$	Оценка
1	28,466	5
2	51,174	4
27	180,634	3
28	413,755	2
30	13,634	5

Примечание: составлено авторами.

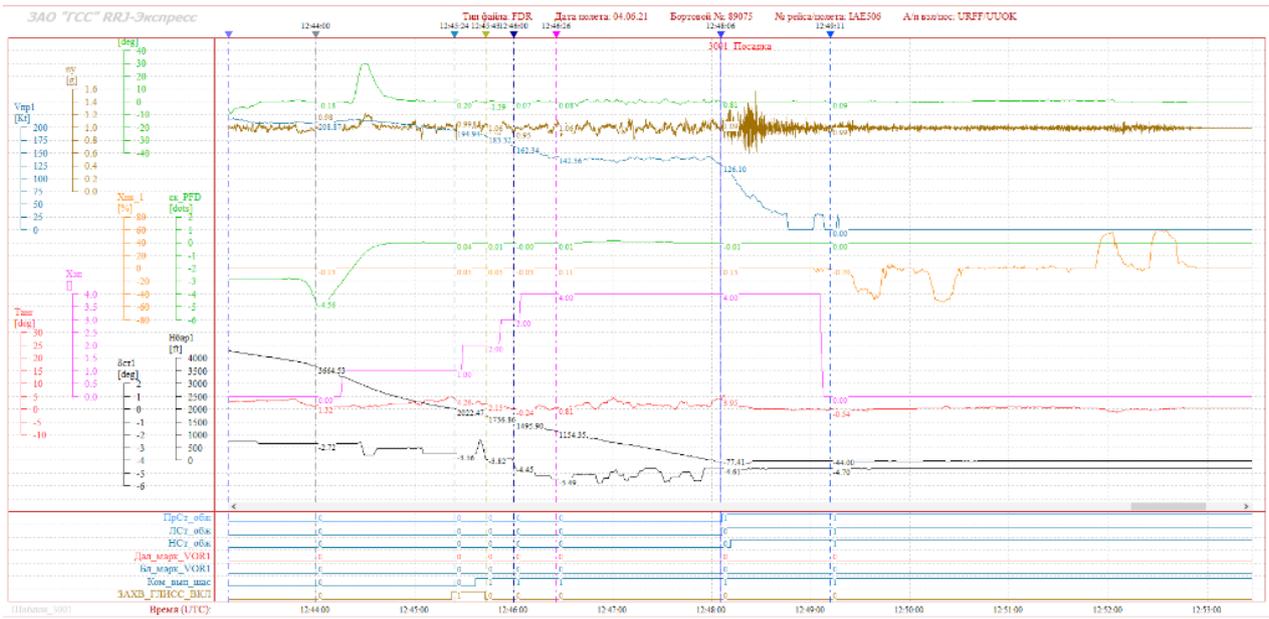


Рис. 2. Сигналограмма записей параметров полета

Примечание: составлено авторами.

Анализ обработки сигналограмм (более чем 200 полетов при выполнении предпосадочного маневра для среднемагистрального ВС, выполненных командирами ВС одной из авиакомпаний) показал, что наиболее предпочтительным является метод выбора в качестве эталонных значений параметров для оценивания качества техники пилотирования такой числовой характеристики как медиана. Отклонения от нее назначаются в долях по пятибалльной шкале оценивания

Апробация данной методики показала возможность ее практической реализации для оценки качества пилотирования. Применение данной методики можно рекомендовать для массового применения в авиационных компаниях и летных училищах.

Пример результатов оценки качества пилотирования по критерию *M* (медиана) приведен на рис. 3. Общая оценка за данный полет «неудовлетворительно».

Программный комплекс позволяет наглядно просмотреть отклонения параметров (красная линия) от эталона (синяя линия) и провести анализ выдерживания значений параметров оценивания в каждой точке предпосадочного маневра. Примеры вывода результатов оценивания показаны на рис. 4 и 5.

Зеленые линии означают отклонения от эталона с оценками 5, 4 и 3 балла.

Вывод: из рис. 3 и 4 следует, что угол тангажа ни в одной из пяти точек не вышел за рекомендованные границы. Однако несоответствие тренда и текущей траектории параметров (одновременно занижены и тангаж, и скорость) слишком очевидно.

Поэтому если за первую точку «Тангаж 1/Скорость 1» автомат поставил «3», то за вторую точку захода на посадку «Тангаж 2/Скорость 2» автомат поставил «2». Выдерживание летчиком значений угла тангажа

№ п/п	Сечения i и j	г(i,j)	Тек. зн.	Оценка	
1	Высота 1/Высота 2	0.9222	24.795479	2+	■
2	Высота 2/Высота 3	0.8093	23.193672	2+	■
3	Тангаж 2/Скорость 2	-0.6588	0.393108	2+	■
4	Высота 1/Высота 3	0.6558	19.017784	2+	■
5	Высота 3/Высота 4	0.5919	-2.096151	2	■
6	Тангаж 1/Скорость 1	-0.5897	0.488856	3+	■
7	Тангаж 4/Скорость 4	-0.5848	-0.229053	5+	■
8	Скорость 1/Скорость 2	0.4630	0.566322	5+	■
9	Тангаж 1/Тангаж 2	0.4155	0.339336	5+	■
10	Тангаж 2/Высота 1	-0.3683	-2.358811	2	■
11	Тангаж 1/Высота 1	-0.3649	-2.924823	2	■
12	Тангаж 1/Скорость 2	-0.3635	0.487437	3+	■

Общая оценка **Ниже нормы**

Рис. 3. Результат оценки полета по 12 параметрам

Примечание: составлено авторами.

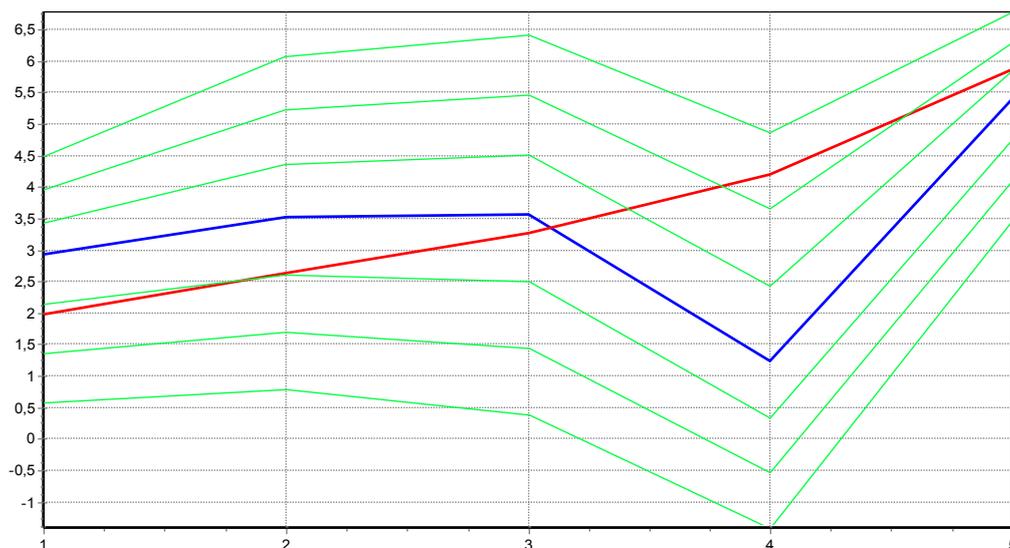


Рис. 4. Модель захода на посадку в данной геолокации по тангажу  
Примечание: составлено авторами.

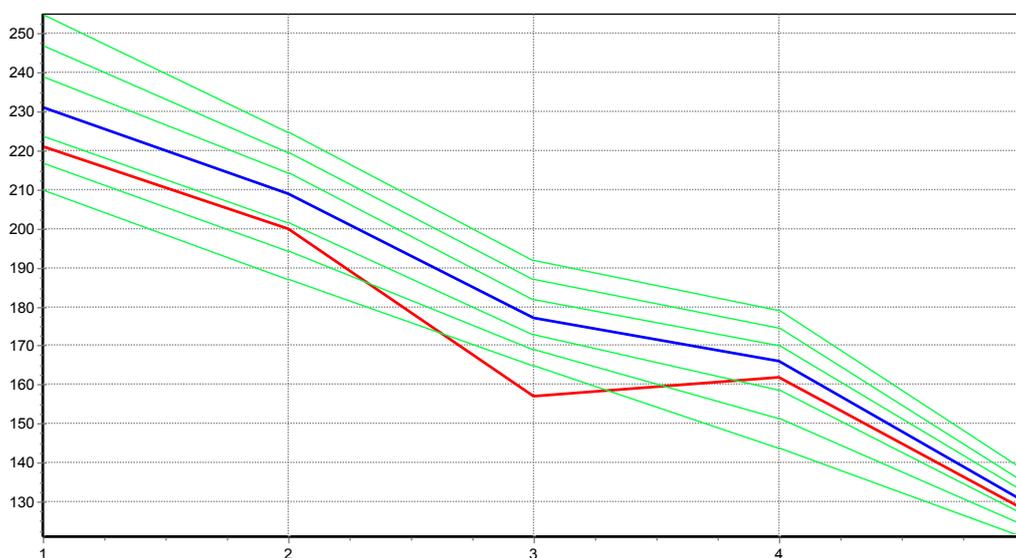


Рис. 5. Модель захода на посадку в данной геолокации по скорости  
Примечание: составлено авторами.

и скорости в точке 2 на неудовлетворительную оценку стала причиной того, что «Скорость 3» в третьей точке опустилась ниже нормы.

Вполне возможно, что в этой точке имел место авиационный инцидент, не замеченный обычным объективным контролем.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложены два подхода к решению задачи количественной оценки за технику пилотирования. На их основе разработано алгоритмическое и программное обеспече-

ние для обработки полетной информации, регистрируемой штатными бортовыми регистраторами, дополняющее и повышающее эффективность существующей системы объективного контроля действий летчика. Предлагаемое ПО можно использовать в виде отдельных программных модулей для наземных комплексов обработки полетной информации.

Предлагаемые методики и ПО позволяют перейти к другому, более высокому уровню оценивания качества пилотирования. Их применение повысит объективность и достовер-

ность анализа выполненного полета, позволит автоматизировать оценку качества техники

пилотирования и строить прогнозные модели для оптимизации летной подготовки [9].

### Список источников

1. Руководство по организации сбора, обработки и использования полетной информации в авиапредприятиях гражданской авиации Российской Федерации (утв. Росавиацией 30.04.2020). Доступ из СПС «Консультант Плюс».
2. Специальное программное обеспечение «RRJ-Экспресс» RRJ0000-IN-055-180 rev. F : руководство пользователя. М. : Региональные самолеты, 2021. 123 с.
3. Устинов В. В., Кашковский В. В. Методика построения программ летной подготовки с учетом количественных показателей оценки уровня натренированности // Актуальные вопросы обеспечения комплексной безопасности на транспорте : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 12–15 ноября 2024 г., г. Санкт-Петербург. СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. главного маршала авиации А. А. Новикова, 2025. С. 127–132.
4. Бутырин О. А., Клещенко С. В. Методика количественной оценки качества техники пилотирования летчика в рейсовых условиях // Проблемы безопасности полетов. 2008. № 9. С. 17–30.
5. Бутырин О. А., Клещенко С. В. Методика оптимального полета // Проблемы безопасности полетов. 2008. № 10. С. 23–30.
6. Вставский С. А., Гайсенек А. В., Устинов В. В. Методика автоматизации процесса разработки планов подготовки летного состава с учетом количественных показателей уровня натренированности и балльного оценивания качества техники пилотирования // Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации – 2024 : сб. тр. XVII Всерос. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов, 05–06 декабря 2024 г., г. Иркутск. Иркутск : Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МГТУ ГА», 2025. Т. 1. С. 127–134.
7. Устинов В. В., Кашковский В. В., Чобанян Л. Г. Методика, алгоритм и критерий количественного оценивания качества выполнения маневра захода на посадку и посадки среднемагистрального воздушного судна по данным средств объективного контроля // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2022. № 1. С. 51–72.
8. Устинов В. В., Назаров П. С. Один из подходов к планированию подготовки курсантов летных училищ с учетом уровня натренированности и качества выполнения полетного задания // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2020. № 1. С. 74–88.

### References

1. Guidelines for the organization of collection, processing and use of flight information in civil aviation enterprises of the Russian Federation (approved by Rosaviatsia on April 30, 2020). Accessed through Law assistance system “Consultant Plus”. (In Russ.).
2. Spetsialnoe programmnoe obespechenie “RRJ-Ekspress” RRJ0000-IN-055-180 rev. F: user manual. Moscow: Regionalnye samolety; 2021. 123 p. (In Russ.).
3. Ustinov V. V., Kashkovsky V. V. Method of constructing flight training programs taking into account quantitative indicators for assessing the level of training. In: *Proceedings of International Research-to-Practice Conference “Aktualnye voprosy obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti na transporte”*, November 12–15, 2024, Saint Petersburg. St. Petersburg: Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov; 2025. p. 127–132. (In Russ.).
4. Butyrin O. A., Kleshchenko S. V. Metodika kolichestvennoi otsenki kachestva tekhniki pilotirovaniya letchika v reisovykh usloviyakh. *Problemy bezopasnosti poletov*. 2008;(9):17–30. (In Russ.).
5. Butyrin O. A., Kleshchenko S. V. Metodika optimalnogo poleta. *Problemy bezopasnosti poletov*. 2008;(10):23–30. (In Russ.).
6. Vstavskiy S. A., Gaisenek A. V., Ustinov V. V. Metodika avtomatizatsii protsesssa razrabotki planov podgotovki letnogo sostava s uchyotom kolichestvennykh pokazateley urovnya natrenirovannosti i ballnogo otsenivaniya kachestva tekhniki pilotirovaniya. In: *Proceedings of All-Russian Research-to-Practice Conference of Students and Postgraduates “Aktualnye problemy razvitiya aviatsionnoy tekhniki I metodov ee ekspluatatsii”*, December 5–6, 2024, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation; 2025. Vol. 1. p. 127–134. (In Russ.).
7. Ustinov V. V., Kashkovsky V. V., Chobanyan L. G. The methodology, algorithm and criterion of quantitative evaluation of the quality of the landing approach maneuver and landing of a medium-haul aircraft according to the data of objective control means. *Crede Experto: Transport, Society, Education, Language*. 2022;(1):51–72. (In Russ.).
8. Ustinov V. V., Nazarov P. S. One of the approaches to designing training for flight students based on the proficiency level and the performance of the flight task. *Crede Experto: Transport, Society, Education, Language*. 2020;(1):74–88. (In Russ.).
9. Chobanyan L. G., Nazarov P. S. Metodika, algoritm i kriterii kolichestvennogo otsenivaniya kachestva vypolneniya manevrov i figur pilotazha po dannym

9. Чобанян Л. Г., Назаров П. С. Методика, алгоритм и критерий количественного оценивания качества выполнения маневров и фигур пилотажа по данным средств объективного контроля // Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации – 2021 : сб. тр. XIV Всерос. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов, 09–10 февраля 2022 г., г. Иркутск. Иркутск : Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», 2022. Т. 1. С. 51–72.

#### Информация об авторах

**В. В. Кашковский** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор, член-корреспондент Академии инженерных наук имени А. Н. Прохорова;

<https://orcid.org/0000-0002-2865-2129>,  
[viktor.kashkovskij@mail.ru](mailto:viktor.kashkovskij@mail.ru)

**В. В. Устинов** – старший преподаватель;  
<https://orcid.org/0000-0002-3399-6671>,  
[ustinov\\_1956@mail.ru](mailto:ustinov_1956@mail.ru)✉

nsredstv obieektivnogo kontrolya. In: *Collection of articles of the 14th All-Russian Research-to-Practice conference of students and postgraduates “Aktualnye problemy razvitiia aviatsionnoi tekhniki i metodov ee ekspluatatsii-2021”*, February 9–10, 2022, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation; 2022. Vol. 1. p. 51–72. (In Russ.).

#### About the authors

**V. V. Kashkovsky** – Doctor of Sciences (Engineering), Senior Researcher, Professor, Corresponding Member of Academy of Engineering Sciences named after A. N. Prokhorov;

<https://orcid.org/0000-0002-2865-2129>,  
[viktor.kashkovskij@mail.ru](mailto:viktor.kashkovskij@mail.ru)

**V. V. Ustinov** – Senior Lecturer;  
<https://orcid.org/0000-0002-3399-6671>,  
[ustinov\\_1956@mail.ru](mailto:ustinov_1956@mail.ru)✉

Научная статья

УДК 004.738.1

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-7>



## Разработка методики мониторинга и оценки контента веб-сайтов общеобразовательных организаций для повышения их информационного наполнения

**Виталий Николаевич Комаров<sup>1✉</sup>, Виктор Викторович Ерохин<sup>2</sup>,  
Сергей Михайлович Роцин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны «Алмаз – Антей» им. академика В. П. Ефремова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации, Москва, Россия

<sup>3</sup>Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается проблемная ситуация с наполнением сайтов школ информацией, не входящей по требованиям законодательства в перечень обязательной для публикации, но являющейся крайне востребованной родительским сообществом, учениками, педагогическим составом. В данном подходе заключается научная новизна, поскольку имеющиеся решения направлены на работу только с обязательной для публикации информации на сайтах школ. Однако востребованной информации, как показал проведенный в данной работе анализ, на сайтах школ недостаточно. Таким образом, становится актуальной задача автоматизации мониторинга и оценки контента сайтов школ путем разработки методики для применения ее в автоматизированном программном комплексе мониторинга и оценки информации. Целью исследования данной статьи является повышение информационного обеспечения сайтов школ путем разработки и применения методики мониторинга и оценки контента веб-сайтов для автоматизированного программного комплекса. Для достижения цели решается ряд задач: анализ проблемной ситуации, разрабатывается классификация информационного обеспечения сайтов школ и разработка методики мониторинга и оценки информационного обеспечения сайтов школ. Объектом исследования в работе являются школьные сайты. Предметом исследования являются компьютерные методы обработки текстовой информации. Методология исследования включала анализ существующих методик оценки информационного наполнения сайтов. Результаты показали, что разработанная методика позволяет эффективно проводить оценку информационного обеспечения школьных сайтов, в том числе с помощью автоматизированного программного комплекса.

**Ключевые слова:** мониторинг и оценка информационного обеспечения сайтов школ, методика мониторинга сайтов школ, автоматизация мониторинга и оценки контента, информационное наполнение сайтов

**Для цитирования:** Комаров В. Н., Ерохин В. В., Роцин С. М. Разработка методики мониторинга и оценки контента веб-сайтов общеобразовательных организаций для повышения их информационного наполнения // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 3. С. 63–71. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-7>.

Original article

### Monitoring methods and assessment of educational organizations' websites to enhance their content

**Vitaliy N. Komarov<sup>1✉</sup>, Viktor V. Erokhin<sup>2</sup>, Sergey M. Roshchin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Science and Education Center of Aerospace Defense “Almaz – Antey”, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow State Institute of International Relations (University) of the Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Bryansk State Technological University of Engineering, Bryansk, Russia

**Abstract.** The paper examines how school websites are filled with information that is not required by law to be published but is highly demanded by the parent community, pupils, and teaching staff. Due to the fact that current solutions only deal with required information for school website publication, this approach has academic novelty. The analysis proved that there is not enough relevant information on school websites. Therefore, the development of assessment and monitoring automation of websites' content is relevant, and they are developing it by creating methods that can be implemented in an automated program suite. The aim is to improve websites' information content by implementing monitoring and assessment methods for automated program suite. To achieve the aim, the authors analyzed complex situations, developed information website content classification and created monitoring and assessment methods for school websites' information content. The object of the research is school websites. The subject of the research is computer methods of text information processing. Methods of the research included an analysis of existing methods for assessment of information content on the website. The results revealed that developed methods enabled an effective assessment of information content on school websites with the use of an automated program suite as well.

**Keywords:** monitoring and assessment of school websites' information content, school websites' monitoring methods, automation of content monitoring and assessment, information content of websites

**For citation:** Komarov V. N., Erokhin V. V., Roshchin S. M. Monitoring methods and assessment of educational organizations' websites to enhance their content. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(3):63–71. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-7>.

## ВВЕДЕНИЕ

Ранее, в ходе диссертационного исследования, авторы в работах [1, 2] анализировали влияние современных интернет-изданий на общество. В рамках этого исследования была предложена концепция для отслеживания и анализа данных электронных новостных ресурсов. В материалах указанных публикаций представлены общая архитектура и алгоритм функционирования разрабатываемой системы. В статье [3] продемонстрировано моделирование данной системы с применением методов модельно-ориентированного системного инжиниринга. В настоящей работе представлена методика мониторинга и оценки контента для программного комплекса, направленная на повышение качества наполнения школьных веб-ресурсов.

Законодательством Российской Федерации закреплено определение – информационная открытость, а также структура официального сайта образовательной организации в информационно-телекоммуникационной сети Интернет и формат представления информации [4, 5].

Под информационной открытостью подразумевается обеспечение доступности сведений о деятельности образовательной организации для широкой общественности, включая

родителей, обучающихся, сотрудников и других заинтересованных сторон.

Информационная открытость законодательно регламентирует, какую информацию образовательные организации должны публиковать на своих сайтах в обязательном порядке. Разработаны Приказы, Распоряжения, Методические указания и прочие документы, в которых расписаны перечни разделов сайта общеобразовательной организации, перечни обязательных к публикации документов. Информационная открытость контролируется надзорными органами, поэтому образовательные организации обеспечивают своевременное размещение обязательной информации на своих сайтах.

Иная ситуация сложилась с информацией, которая не является законодательно-обязательной к публикации, но востребована пользователями.

Информационное наполнение (контент) – это поддержание информационного наполнения сайта в актуальном состоянии, отслеживание наличия разделов, востребованных у пользователей, популярности размещенных материалов, количества посетителей сайта, времени проведения пользователями на сайте, количества просмотренных страниц за один визит (глубина просмотра).

Эффективное информационное наполнение веб-сайта должно полностью отражать его цели и соответствовать базовым информационным запросам аудитории. Согласно ожиданиям пользователей, ресурс должен предоставлять данные, максимально ориентированные на их конкретные задачи и ключевые потребности. При необходимости недостающая информация может быть доступна через гиперссылки на внешние веб-платформы, где она размещена [6, 7].

Ключевыми словами в определении термина информационное наполнение, в отличие от термина информационная открытость, являются: соответствие ожиданиям пользовате-

лей, информационные потребности (то есть важность информации для учеников, родителей и сотрудников школы). Можно выделить «неформальное» отличие информационной открытости от информационного наполнения. Первое направлено на официальную, законодательно обязательную для размещения информацию, а второе, в большей степени, на информацию, которая должна привлекать пользователей на сайт за счет популярности материалов, интересностью, актуальностью и достоверностью.

В табл. 1 показаны сравнительные характеристики информационной открытости и информационного наполнения сайтов школ.

Таблица 1

**Сравнительные характеристики информационной открытости и информационного наполнения сайтов школ**

Наименование параметра	Информационная открытость сайта школы	Информационное наполнение сайта школы
Законодательная основа определения	Статья 29 главы 3 федерального закона от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» Приказ Рособнадзора от 04.08.23 № 1493 «Об утверждении Требований к структуре официального сайта образовательной организации в информационно-телекоммуникационной сети Интернет и формату представления информации» Приказ Рособнадзора от 10.06.2019 № 796 «Об установлении процедуры, сроков проведения и показателей мониторинга системы образования Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки»	ГОСТ Р ИСО 9241-151-2014 «Эргономика взаимодействия человек – система» ГОСТ Р 52872-2019 «Интернет-ресурсы и другая информация, представленная в электронно-цифровой форме. Приложения для стационарных и мобильных устройств, иные пользовательские интерфейсы. Требования доступности для людей с инвалидностью и других лиц с ограничениями жизнедеятельности»
Регламентируемость информации	Четкая структура обязательных разделов сайта и формат предоставления информации, что облегчает поиск и мониторинг информации	Информация размещается в произвольном формате и объеме. Структура разделов формируется произвольным образом, что затрудняет поиск и мониторинг информации
Контроль	Контролируется надзорными органами, в том числе через официальный сервис Рособконтроль.рф «Проверка сайта на соответствие требованиям законодательства в сфере образования»	Нерегулярный характер контроля руководством школы, в исключительных случаях – муниципальным (районным) управлением образования
Характер информации	Официальный, чаще в форме документов, отчетов, планов, предписаний, и ориентирован на выполнение требований законодательства и отчетности перед надзорными органами	Информация ориентирована на потребителя (родителей, учеников, учителей), подается в простой, понятной форме (новостные сообщения, объявления, информация о жизни школы, направлениях внеурочной деятельности, олимпиадах, воспитании, профориентации и пр.)
Цель	Обеспечение открытости и доступности информации, из перечня статьи 29 главы 3 федерального закона от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» и в иных нормативных актах	Обеспечение открытости и доступности информации о деятельности образовательной организации, не входящей в обязательный перечень для публикации, но востребованной потребителями (родителями, учениками, учителями)

Примечание: составлено авторами по [1, 2, 3, 4].

Для решения задачи повышения информационного наполнения сайтов школ востребованной информацией необходимо разработать классификацию такой информации с целью использования ее в методике для автоматизированного мониторинга и оценки с помощью программного комплекса.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для формирования классификации сайтов, включающей информацию, не закрепленную законодательно, но востребованную среди пользователей, был выполнен анализ выборки школьных сайтов (более 300 ресурсов в различ-

ных регионах РФ). В результате исследования выделен ориентировочный список разделов, используемых в качестве критериев оценки информативности сайтов. Общее количество таких параметров составило 70. Фрагмент данной классификации приведен в табл. 2.

Методика мониторинга и оценки информационного обеспечения сайтов общеобразовательных организаций разработана с учетом пользовательского подхода, ориентированного на анализ потребностей и ожиданий целевых аудиторий (обучающихся, родителей, педагогических работников), которые определены как ключевые критерии оценки школьных веб-ресурсов.

Таблица 2

Фрагмент классификации разделов сайтов (параметров оценки информативности)

№ п. п.	Наименование раздела сайта (параметр оценки информативности)	Наличие на сайте есть/нет (1 или 0)
	<b>ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ</b>	
1	Дополнительное образование: <ul style="list-style-type: none"> <li>• творческие объединения;</li> <li>• группы развития;</li> <li>• курсы;</li> <li>• кружки</li> </ul>	(1 или 0)
2	Дополнительная внеурочная подготовка к ОГЭ и ЕГЭ	(1 или 0)
3	Курсы подготовки к школе для детей 5,5–6 лет	(1 или 0)
4	Проектная деятельность: <ul style="list-style-type: none"> <li>• учебно-исследовательская и проектная деятельность обучающихся (исследовательское, инженерное, прикладное, информационное, социальное, игровое, творческое направление проектов, формирование ИКТ-компетенций)</li> </ul>	(1 или 0)
5	Инновационная деятельность: <i>Технокластер</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• модернизация воспитательной деятельности;</li> <li>• опытно-экспериментальная площадка;</li> <li>• сетевое взаимодействие</li> </ul>	(1 или 0)
6	Работа с детьми с особыми образовательными потребностями	(1 или 0)
	<b>ПРОФИОРИЕНТАЦИОННАЯ РАБОТА</b>	
7	Профориентация: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Единая модель профориентации (базовый уровень, основной уровень, продвину- тый уровень),</li> <li>• Направления профориентации:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>а) профильные предпрофессиональные классы;</li> <li>б) урочная деятельность;</li> <li>с) внеурочная деятельность;</li> <li>д) воспитательная работа;</li> <li>е) дополнительное образование;</li> <li>ф) профобучение;</li> <li>г) взаимодействие с родителями (законными представителями).</li> </ul> </li> </ul> Профориентационный минимум Проектория Единая платформа по профориентации «Билет в будущее»	(1 или 0)

Примечание: составлено авторами по [1, 2, 3, 4, 8].



## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанный интегрированный показатель информационного обеспечения сайтов школ, который принимает значение от 0 до 1, позволяет сформировать таблицу классификации сайтов школ по информационному наполнению (табл. 3).

Для апробации методики и проверки корректности интегрированного показателя информационного обеспечения сайтов школ был проведен мониторинг сайтов из общероссийского рейтинга образовательных сайтов (<https://rating-web.ru>), получивших наибольший балл за 2024 г.

С помощью сервиса [similarweb.com](https://similarweb.com), предоставляющего сведения о посещаемости сайтов, времени пребывания посетителей на сайте, глубине просмотра страниц и проценте отказа от просмотра сайтов, были отображены данные о 100 школьных сайтах (внешние независимые показатели). Фрагмент таблицы представлен на рисунке 2.

Данные показатели можно применить в корреляционном сравнении с интегрированным показателем информационного обеспечения.

Для получения показателя  $I_{\text{информативности}}$  была проведена «ручная» оценка 11 сайтов по параметрам информативности чек-листа таблицы 2 (рис. 3).

Проведем оценку корреляции интегрированного показателя с показателями глубины просмотра страниц сайтов и времени нахождения посетителя на сайте по методу Пирсона и Спирмена.

Коэффициент корреляции Пирсона ( $r$ ) рассчитывается по формуле (2):

$$r = \frac{(n \sum xy - \sum x \sum y)}{\sqrt{\left[ \left( n \sum x^2 - (\sum x)^2 \right) \times \left( n \sum y^2 - (\sum y)^2 \right) \right]}}, \quad (2)$$

где:

$x$  и  $y$  – две сравниваемые переменные (интегрированный показатель и глубина просмотра страниц);

Таблица 3

Классификация сайтов школ по значениям интегрированного показателя информационного наполнения сайтов

$I_{\text{content}}$	Группа сайтов по информационному наполнению
0–0,2	Низкое информационное наполнение
0,21–0,4	Ниже среднего информационное наполнение
0,41–0,6	Среднее информационное наполнение
0,61–0,8	Выше среднего информационное наполнение
0,81–1,0	Высокое информационное наполнение

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

№	Организация	Сайт	Визиты, тыс	Отказы	Время на сайте, мин	Глубина просмотра
1	Адаптивная школа № 12 (Омск)	<a href="https://ash12-omsk.gosuslugi.ru">https://ash12-omsk.gosuslugi.ru</a>	н/д	н/д	н/д	н/д
2	Амурская СОШ (Челяб. Обл)	<a href="https://schaminevo-uisk.educh.ru">https://schaminevo-uisk.educh.ru</a>	8,8	59,5	2,5	2,34
3	Архангельская СОШ им. А. Н. Косыгина (МО)	<a href="https://mouasoh.edumsko.ru/">https://mouasoh.edumsko.ru/</a>	3,6	38,2	н/д	1,62
4	Белореченский лицей (Иркутск. обл)	<a href="https://beloryceum.gosuslugi.ru">https://beloryceum.gosuslugi.ru</a>	1,3	100	н/д	1
5	Варшавская школа (Челяб. Обл)	<a href="http://schvarshavkar.educhel.ru">http://schvarshavkar.educhel.ru</a>	0,9	98,5	н/д	1,07
!!! 6	ГБОУ гимназия №505 (Спб)	<a href="http://gymnase505.krsl.gov.spb">http://gymnase505.krsl.gov.spb</a>	3,7	43,5	1	3,44
7	ГБОУ лицей №299 (Спб)	<a href="https://299school.spb.ru/">https://299school.spb.ru/</a>	14,8	34,2	1,5	1,7
8	ГБОУ "Морской лицей" (Спб)	<a href="https://морской-лицей.рф">https://морской-лицей.рф</a>	н/д	н/д	н/д	н/д
9	ГБОУ СОШ № 391 (Спб)	<a href="https://school391.ru/">https://school391.ru/</a>	2,1	45,7	1,5	2,37
10	ГБОУ СОШ № 692 (Спб)	<a href="https://692.spb.ru/">https://692.spb.ru/</a>	3,1	54,9	н/д	1,02
11	ГБОУ Школа № 1539 (М)	<a href="http://gym1539sv.mskobr.ru/">http://gym1539sv.mskobr.ru/</a>	5,7	41	1,5	3,21
12	ГБОУ школа №203 (Спб)	<a href="https://school203.spb.ru/">https://school203.spb.ru/</a>	1,2	45,7	н/д	1,01
13	ГБОУ школа № 219 (Спб)	<a href="https://school219.ru/">https://school219.ru/</a>	3	41,3	1,5	8
14	ГБОУ школы №335 (Спб)	<a href="http://school335.ru/">http://school335.ru/</a>	1,7	42,3	1,5	2,61
15	Гимназии № 540 (Спб)	<a href="http://www.gymnasium540.ru/">http://www.gymnasium540.ru/</a>	2,5	54,7	1	1,9
16	Гимназия № 14 (МО)	<a href="http://ozggym14.edumsko.ru/">http://ozggym14.edumsko.ru/</a>	6,8	65,5	0,5	1,64
17	Гимназия № 15 (МО)	<a href="http://ozggym15.edumsko.ru/">http://ozggym15.edumsko.ru/</a>	2	93,4	1	1,02
18	Гимназия №2 (МО)	<a href="http://kr-school2.edumsko.ru/">http://kr-school2.edumsko.ru/</a>	0,4	100	н/д	1
19	Гимназия № 24 (Севастополь)	<a href="http://gymnaziya24.edusev.ru/">http://gymnaziya24.edusev.ru/</a>	6,6	43,5	0,5	6,87
20	Демидовский лицей (МО)	<a href="https://ozr-shkdem.edumsko.ru">https://ozr-shkdem.edumsko.ru</a>	2,2	55,8	0	1,38
21	Домодедовская школа № 8 (МО)	<a href="http://domodsch8.edumsko.ru">http://domodsch8.edumsko.ru</a>	7,1	83,1	0,5	2,26
22	Запрудненская гимназия	<a href="https://zapr-nv-mnasilium.edumsk">https://zapr-nv-mnasilium.edumsk</a>	н/д	н/д	н/д	н/д

Рис. 2. Показатели школьных сайтов из рейтинга общероссийского рейтинга образовательных сайтов

Примечание: составлено авторами.

		Критерии оценки информативности сайта																													
		Общеобразовательные учебные организации																													
Параметр оценки информативности (R <sub>0</sub> = да — 1, нет — 0)		МБОУ СОШ № 22 (В. Паша)	Итог	Адаптированная школа № 12 (Овск)	Итог	Академический лицей № 25 (Овск)	Итог	Архангельская СОШ им. С. И. Бессарабова (Овск)	Итог	Бессарабовская СОШ (Овск)	Итог	Высшая школа № 29 (Овск)	Итог	ГБОУ школа № 505 (Овск)	Итог	ГБОУ школа № 591 (Овск)	Итог	ГБОУ школа № 602 (Овск)	Итог	ГБОУ школа № 1539 (Овск)	Итог	Итого									
4	НАША ШКОЛА																														
5	Наши достижения:	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
6	Лучшие в учебе, спорте, творчестве																														
7	История школы:	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
8	Интересные факты																														
9	Известные выпускники																														
10	Сведения о ремонте школы	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	Совет ветеранов педагогического труда	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	Страничка профсоюзной организации	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
13	Предприятия партнеры школы	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14	Сотрудничество с вузами	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Совместные партнеры школы	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
16	График каникул	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
17	НОВОСТИ. АНОНСЫ. СОБЫТИЯ																														
18	Новости школы	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
19	Календарь событий	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	СМИ о нашей школе	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	Информация Минпросвещения	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
22	ШКОЛЬНЫЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ																														
23	Школьный медиацентр:	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
24	Визуализация новостей																														
25	Репортажи о мероприятиях																														
26	Оперативные объявления																														
27	Школьный сайт																														
175	Экологическое воспитание																														
176	МОЛОДЕЖНЫЕ ДВИЖЕНИЯ																														
177	Волонтерское движение	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
178	Движение первых	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
179	ЭЛЕКТРОННЫЕ ПЛОЩАДКИ																														
180	Расписание	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
181	Дистанционное обучение	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
182	Электронный журнал	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
183	Электронный дневник	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
184	Информационные системы по поддержке молодежи	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
185	Сумма оценок с учетом веса:		34		43		45		46		35		53		56		43		48		46		54								
186	Информативность		0,49		0,61		0,64		0,66		0,5		0,76		0,8		0,61		0,69		0,66		0,77								

Рис. 3. Фрагмент таблицы оценки сайтов по параметрам информативности  
Примечание: составлено авторами.

$n$  – количество точек данных (количество сайтов);

$\sum xy$  – сумма произведения парных оценок ( $x$  и  $y$ );

$\sum x^2$  и  $\sum y^2$  – суммы квадратов для каждой переменной.

Рассчитаем коэффициент корреляции по формуле Пирсона:

$$r = \frac{(11 \cdot 15,15 - 7,28 \cdot 22,21)}{\sqrt{[(11 \cdot 4,93 - (7,28)^2) \times (n \cdot 1 \cdot 52,1 - (22,21)^2)]}} = 0,5.$$

Коэффициент корреляции Пирсона – это показатель, который демонстрирует силу и направление линейной зависимости между двумя непрерывными переменными. Его значение может находиться в диапазоне от  $-1$  до  $1$ .

С помощью этого коэффициента можно определить, насколько данные на диаграмме рассеяния приближаются к прямой линии регрессии:

Если коэффициент равен  $+1$ , то это означает наличие идеальной положительной линей-

ной зависимости: при увеличении одной переменной другая также строго увеличивается.

Если коэффициент равен  $-1$ , то это указывает на идеальную отрицательную линейную связь: при увеличении одной переменной другая пропорционально уменьшается.

Если коэффициент равен  $0$ , то это говорит об отсутствии линейной корреляции между переменными: их изменения не связаны прямо пропорциональной зависимостью.

Стоит отметить, что коэффициент Пирсона не учитывает нелинейные связи и не подразумевает наличия причинно-следственной связи между переменными.

Получившийся коэффициент  $0,5$  говорит о 50-процентной зависимости просмотра сайта от его наполняемости.

Тем не менее следует провести второй расчет по ранговой корреляции Спирмена, которая исключает линейную зависимость данных.

Чтобы рассчитать коэффициент, нужно выполнить следующие шаги:

Сначала нужно упорядочить признаки по возрастанию, то есть распределить их

в порядке от меньшего к большему. Каждому признаку присваивается порядковый номер – ранг. Если два признака имеют одинаковые значения, им присваивается одинаковый ранг, который равен среднему арифметическому от их порядковых номеров.

Затем для каждой пары сопоставляемых значений необходимо определить разность рангов по указанной формуле (3):

$$d = dx - dy. \quad (3)$$

Возведение в квадрат разность  $d_i$  и нахождение общей суммы,  $\sum d^2$ .

Вычисление коэффициента корреляции рангов по формуле (4):

$$r = 1 - 6 \frac{\sum d^2}{n^3 - n}, \quad (4)$$

где  $d^2$  – квадрат разностей между рангами;  $n$  – количество признаков, участвовавших в ранжировании.

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена обладает следующими свойствами:

1. Нормируемость: значение коэффициента корреляции рангов варьируется в пределах от  $-1$  до  $+1$ . Если  $r = 1$ , это может указывать на наличие прямой связи между рядами. Если  $r = -1$ , это может свидетельствовать о наличии обратной связи.

2. Независимость: для получения адекватного результата не требуется, чтобы коррелируемые ряды подчинялись нормальному закону распределения.

Было выполнено (рис. 4):

1. Значения А и В были проранжированы, их ранги внесены в колонки «Ранг А» и «Ранг В».

2. В колонке  $d$  была рассчитана разница между рангами А и В.

3. В колонке  $d^2$  каждая разница  $d$  была возведена в квадрат.

4. Затем была найдена сумма квадратов.

5. Далее был выполнен расчет коэффициента ранговой корреляции  $r_s$  с использованием формулы.

6. В завершение были определены критические значения.

N	Значения А	Ранг А	Значения В	Ранг В	d (ранг А - ранг В)	d <sup>2</sup>
1	0.49	1	1.83	6	-5	25
2	0.64	4	2.34	7	-3	9
3	0.66	5.5	1.62	4	1.5	2.25
4	0.5	2	1	1	1	1
5	0.76	9	1.07	3	6	36
6	0.8	11	3.44	11	0	0
7	0.61	3	1.7	5	-2	4
8	0.69	7	2.37	8	-1	1
9	0.66	5.5	1.02	2	3.5	12.25
10	0.77	10	3.21	10	0	0
11	0.7	8	2.61	9	-1	1
Суммы		66		66	0	91.5

Рис. 4. Расчет коэффициента ранговой корреляции Спирмена

Примечание: составлено авторами.

Результат:  $r_s = 0.584$ .

Коэффициент Спирмена показал лучший результат, подтверждающий корреляцию между данными просмотра сайтов и наполняемостью их контентом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика мониторинга и оценки информационного обеспечения, позволяющая провести классификацию сайтов школ по значениям интегрированного показателя информационного наполнения, составляет основу для разработки программного комплекса для автоматизации мониторинга и оценки информационного наполнения школьных сайтов.

#### Список источников

1. Комаров В. Н., Роцин С. М. Мониторинг и системный анализ информации электронных СМИ для промышленных предприятий // «Научные технологии и интеллектуальные системы» : сб. ст. по итогам Междунар. науч.-практ. конф., 23 ноября 2018 г., г. Самара. Самара : ООО «Агентство международных исследований», 2018. С. 36–40.
2. Комаров В. Н., Роцин С. М. Моделирование системы мониторинга и анализа информации электронных СМИ методами модельно-ориентированного системного инжиниринга // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 1. С. 12–22.
3. Об образовании в Российской Федерации : федер. закон от 29.12.2012 № 273-ФЗ ; в ред. от 19.12.2023 // СЗ РФ. 2012 № 53 (Часть I) Ст. 7598. Доступ из СПС «Консультант Плюс».
4. Об утверждении Требований к структуре официального сайта образовательной организации в информационно-телекоммуникационной сети Интернет и формату представления информации : приказ Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки от 04.08.23 №1493. Доступ из СПС «Консультант Плюс».
5. ГОСТ Р ИСО 9241-151-2014. Эргономика взаимодействия человек – система. Руководство по проектированию пользовательских интерфейсов сети Интернет. М. : Стандартинформ, 2015. 50 с.
6. ГОСТ Р 52872-2019. Интернет-ресурсы и другая информация, представленная в электронно-цифровой форме. Приложения для стационарных и мобильных устройств, иные пользовательские интерфейсы. Требования доступности для людей с инвалидностью и других лиц с ограничениями жизнедеятельности. М. : Стандартинформ, 2019. 37 с.
7. Методика построения рейтинга информационной открытости официальных сайтов общеобразовательных учреждений (школ). 2016. URL: [https://www.hse.ru/data/2013/04/18/1297812643/site\\_school\\_metodik.pdf?ysclid=mbjgfh1zd831980027](https://www.hse.ru/data/2013/04/18/1297812643/site_school_metodik.pdf?ysclid=mbjgfh1zd831980027) (дата обращения: 05.06.2025).
8. Трусова А. Ю. Анализ данных. Многомерные статистические методы. Самара : Изд-во Самарского университета, 2023. 92 с.

#### Информация об авторах

**В. Н. Комаров** – аспирант;  
<https://orcid.org/0009-0007-6850-5952>,  
[komaroffvn@mail.ru](mailto:komaroffvn@mail.ru)

**В. В. Ерохин** – доктор технических наук, профессор;  
<https://orcid.org/0000-0002-8754-0012>,  
[v.erokhin@odin.mgimo.ru](mailto:v.erokhin@odin.mgimo.ru)

**С. М. Роцин** – кандидат технических наук, доцент;  
<https://orcid.org/0000-0001-8497-2023>,  
[roschinsm@ya.ru](mailto:roschinsm@ya.ru)

#### References

1. Komarov V. N., Roshchin S. M. Monitoring i sistemnyy analiz informatsii elektronnykh SMI dlya promyshlennykh predpriyatiy. In: *International Research-to-Practice Conference “Naukoemkie tekhnologii i intellektualnye sistemy”*, November 23, 2018, Samara. Samara: ООО “Agency of International Research”; 2018. p. 36–40. (In Russ.).
2. Komarov V. N., Roshchin S. M. Modeling of the system of monitoring and analysis of information of electronic media by methods of model based system engineering. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(1):12–22. (In Russ.).
3. On education in the Russian Federation: Federal law of December 29, 2012, no. 273-FZ. Collection of Legislation Russian Federation. No. 53 (Pt. I). Art. 7598. Accessed through Law assistance system “Consultant Plus”. (In Russ.).
4. On requirements’ approval for the structure of the educational organization official website in the information and telecommunications network “Internet” and information presentation: Order of the Federal Service for Supervision in Education and Science of August 4, 2023, no. 1493. Accessed through Law assistance system “Consultant Plus”. (In Russ.).
5. GOST (State Standard) R ISO 9241-151-2014. Ergonomics of human-system interaction. Part 151. Guidance on World Wide Web user interfaces. Moscow: Standartinform; 2015. 50 p. (In Russ.).
6. GOST (State Standard) R 52872-2019. Internet resources and other digital content. Software applications and user interfaces. Accessibility requirements for persons with disabilities and other special needs. Moscow: Standartinform; 2019. 37 p. (In Russ.).
7. Metodika postroeniya reytinga informatsionnoy otkrytosti ofitsialnykh saytov obshcheobrazovatelnykh uchrezhdeniy (shkol). 2016. URL: [https://www.hse.ru/data/2013/04/18/1297812643/site\\_school\\_metodik.pdf?ysclid=mbjgfh1zd831980027](https://www.hse.ru/data/2013/04/18/1297812643/site_school_metodik.pdf?ysclid=mbjgfh1zd831980027) (accessed: 05.06.2025). (In Russ.).
8. Trusova A. Yu. Analiz dannykh Mnogomernye statisticheskie metody. Samara: Samara State University; 2023. 92 p. (In Russ.).

#### About the authors

**V. N. Komarov** – Postgraduate;  
<https://orcid.org/0009-0007-6850-5952>,  
[komaroffvn@mail.ru](mailto:komaroffvn@mail.ru)

**V. V. Erokhin** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor;  
<https://orcid.org/0000-0002-8754-0012>,  
[v.erokhin@odin.mgimo.ru](mailto:v.erokhin@odin.mgimo.ru)

**S. M. Roshchin** – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;  
<https://orcid.org/0000-0001-8497-2023>,  
[roschinsm@ya.ru](mailto:roschinsm@ya.ru)

Научная статья

УДК 519.17

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-8>



## Представление сетей Петри в матрично-предикатном виде

**Владимир Сергеевич Поляков, Оксана Алексеевна Авдеюк<sup>✉</sup>, Роман Николаевич Никулин**  
*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия*

**Аннотация.** Разработанный авторами матрично-предикатный метод задания конечных графов, примененный для задания конечных автоматов, можно применить и для задания сетей Петри, которые являются двудольным (направленным) мультиграфом. Сеть Петри также можно представить квадратной матрицей в матрично-предикатном виде. Это позволит применять аппарат теории матриц при проведении математических (теоретико-множественных и логических) операций над сетями Петри. Применение в задании сетей элементов теории предикатов позволит повысить гибкость в управлении ими.

**Ключевые слова:** сеть Петри, матрица, предикат, матрично-предикатный вид, граф, позиция, переход

**Для цитирования:** Поляков В. С., Авдеюк О. А., Никулин Р. Н. Представление сетей Петри в матрично-предикатном виде // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 3. С. 72–78. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-8>.

Original article

## Representation of Petri nets in matrix-predicate form

**Vladimir S. Polyakov, Oksana A. Avdeyuk<sup>✉</sup>, Roman N. Nikulin**  
*Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia*

**Abstract.** The matrix-predicate method for defining finite graphs, as introduced by the authors, and utilized for finite state automation, can be used to define Petri nets, which are bipartite (directed) multigraphs. A square matrix can also represent a Petri net in matrix-predicate form. With this, we can apply matrix theory to perform mathematical operations (set-theoretic and logical) on Petri nets. Employing predicate theory elements in network definition will enhance management flexibility.

**Keywords:** Petri net, matrix, predicate, matrix-predicate form, graph, position, transition

**For citation:** Polyakov V. S., Avdeyuk O. A., Nikulin R. N. Representation of Petri nets in matrix-predicate form. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(3):72–78. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-8>.

### ВВЕДЕНИЕ

Сложные системы представляют собой совокупность последовательно и параллельно функционирующих блоков, узлов, компонентов и прочих составляющих. При их построении чаще всего используются следующие методы:

- конечных автоматов,
- сетей Петри,
- нейронных сетей.

При реализации каждого из этих методов используется свой математический аппарат, имеющий свои достоинства и свои недостатки.

Для изучения и работы с моделируемыми системами важным инструментом благодаря своей способности описывать различные классы параллельных, дискретных, асинхронных, распределенных и недетерминированных систем является сеть Петри. Она обеспечивает наглядное описание их функционирования и обладает качественным программным и математическим аппаратом для анализа [1, 2].

В отличие от конечных автоматов, сеть Петри – это композиция графа и дискретной системы, позволяющая реализовать мате-

математическую модель параллельной системы и моделировать широкий класс сложных систем. Как правило, для этой цели используются достаточно простые, общего вида сети. Однако для некоторых подклассов сложных систем используются расширения сетей Петри: временные, иерархические, ингибиторные, раскрашенные сети и другие, подобные им. Но для каждого из этих расширений необходима корректировка используемого математического аппарата, поскольку сетям Петри присущи некоторые недостатки [3, 4].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теория сетей Петри развивается в двух основных направлениях:

- формальная теория сосредоточена на определении и создании понятий, методов и способов работы с сетями;
- прикладная теория включает разработку методов анализа и моделирования с использованием сетей Петри [5].

*Классический способ определения сети Петри (PN).* Традиционно сети Петри можно задать в аналитическом, графическом или матричном виде.

*Аналитический способ задания сетей Петри.* Сеть Петри состоит из двух компонентов:

- собственно сети, которая определяется структурой сети;
- маркировкой позиций (мест) сети, с помощью которой определяется функционирование сети [6, 7].

Структура сети представляет собой 4-кортеж  $(P, T, I, O)$  и является двудольным (направленным) мультиграфом, дуги которого соединяют узлы двух непересекающихся множеств:

множества позиций  $P$ , представляющих собой состояния

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_r, p_n\},$$

множества переходов  $T$ , показывают действия

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_r, t_n\}.$$

Переходы и позиции, соединенные дугами  $f_k$ , делятся на два типа: направленные от позиции к переходам  $(p-t)$ , а также от переходов к позициям  $(t-p)$ . Таким образом, формально

сеть Петри представляется как совокупность множеств:

$$N = (P, T, F),$$

здесь  $P$  – множество позиций,

$T$  – множество переходов,

$F$  – множество дуг сети, причем  $F(p-t) \cup F(t-p)$ ,

где  $F(p-t)$  – множество дуг, ведущих от позиций к переходам,

$F(t-p)$  – множество дуг, ведущих от переходов к позициям.

При таком представлении функционирование сети представляется как взаимодействие позиций и переходов в ней.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим для переходов  $t_j$  следующие функции:

– ввода  $I(t_j): T \rightarrow P$  (отображение из множества переходов в комплекты позиций);

– выхода  $O(t_j): T \rightarrow P$  (отображение из множества переходов в комплекты позиций). Таким образом, в этом случае для перехода  $t_j \rightarrow T$  определяются входные  $I(t_j)$  и выходные  $O(t_j)$  позиции сети, то есть позиция  $p_i$  будет входной позицией перехода  $t_j$ , если  $p_i \in I(t_j)$  и будет выходной позицией этого перехода, если  $p_i \in O(t_j)$ .

Определим для позиций  $p_i$  следующие функции:

– ввода  $I(p_i): P \rightarrow T$  (отображение из множества позиций в комплекты переходов);

– выхода  $O(p_i): P \rightarrow T$  (отображение из множества позиций в комплекты переходов). Таким образом, в этом случае для позиции  $t_i \in P$  определяются входные  $I(p_i)$  и выходные  $O(p_i)$  переходы сети, то есть переход  $t_j$  будет входным переходом позиции  $p_i$ , если  $t_j \in I(p_i)$  и будет выходным переходом этой позиции, если  $t_j \in O(p_i)$ .

Сети Петри представляют собой двудольный (направленный) мультиграф, что означает, что входы и выходы элементов сети могут быть представлены несколькими дугами. Таким образом, они описываются не множествами, а комплектами [8].

В таком случае сеть Петри можно представить 4-кортежем  $(P, T, I, O)$ .

Пример:

Задана структура сети Петри  $C = (P, T, I, O, M)$ , где

$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$  – множество мест (позиций) сети,

$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$  – множество переходов сети,

$I$  – функция входа:  $I(t_1) = \{p_1\}$ ,

$I(t_2) = \{p_1, p_3, p_5\}$ ,

$I(t_3) = \{p_3\}$ ,

$I(t_4) = \{p_4\}$ ,

$O$  – функция выхода:  $O(t_1) = \{p_2, p_3, p_5\}$ ,

$O(t_2) = \{p_5\}$ ,

$O(t_3) = \{p_4\}$ ,

$O(t_4) = \{p_2, p_3\}$ .

Приведенная выше структура сети Петри состоит из пяти позиций, четырех переходов и тринадцати дуг.

Графический способ задания сетей Петри. Таким образом, сеть Петри можно представить как двудольный мультиграф, дуги которого соединяют вершины двух непересекающихся множеств ( $P$  и  $T$ ). Вершины  $P$  множества  $P$  изображают кружками, а вершины  $t_j \in T$  – полочками. Дуги этого мультиграфа всегда направлены либо из вершин множества  $P$  к вершинам множества  $T$ , либо наоборот – из вершин множества  $T$  к вершинам множества  $P$ .

Рассмотренная ранее в примере 1 структура сети Петри представлена на рисунке (рис. 1).

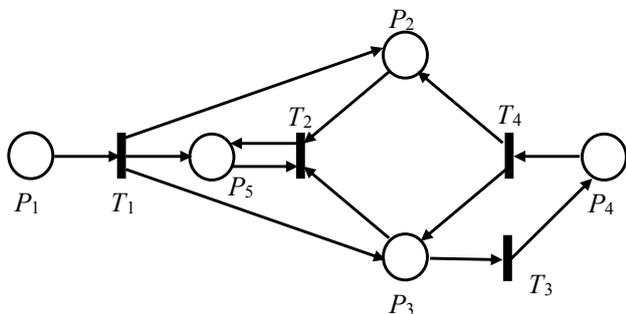


Рис. 1. Структура сети Петри

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Задание сетей Петри матричным способом. Для задания инцидентности вершин сети Петри эффективно применение матриц. Ины-

ми словами, сеть Петри задают двумя матрицами  $Q$  и  $R$ , имеющими  $n$  столбцов (по числу вершин позиций  $p_\varepsilon$ ) и  $k$  строк (по числу вершин переходов  $t_j$ ) (рис. 2).

$$Q = q_{j\varepsilon} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1\varepsilon} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2\varepsilon} & \dots & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{j1} & q_{j2} & \dots & q_{j\varepsilon} & \dots & q_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{k1} & q_{k2} & \dots & q_{k\varepsilon} & \dots & q_{kn} \end{pmatrix}$$

$$R = r_{j\varepsilon} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1\varepsilon} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2\varepsilon} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{j1} & r_{j2} & \dots & r_{j\varepsilon} & \dots & r_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & r_{k\varepsilon} & \dots & r_{kn} \end{pmatrix}$$

Рис. 2. Матричный способ сети Петри

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Элементами матриц являются нули и единицы, которые отражают значения элементов  $q_{j\varepsilon}$  и  $r_{j\varepsilon}$ , заданные выражениями.

Элемент  $q_{j\varepsilon}$  равен единице, если есть дуга от вершины позиции  $p_\varepsilon$  к вершине перехода  $t_j$ , и равен нулю в случае отсутствия дуги.

Элемент  $r_{j\varepsilon}$  равен единице, если имеется дуга от вершины перехода  $t_j$  к вершине позиции  $p_\varepsilon$ , и равен нулю в случае отсутствия дуги.

При задании сети Петри любым из указанных выше способов всегда возможно перейти к любому другому эквивалентному виду задания. Для наглядности часто используются графические методы, в то время как при работе с сетями Петри на компьютере чаще всего применяются аналитические и матричные подходы, что позволяет оперировать с векторами и матрицами.

Маркировка и функционирование сетей Петри. Функционирование сети Петри, с одной стороны, определяется маркировкой сети: присвоением фишек позициям, количеством и расположением их, а с другой сто-

роны – разработанной методикой изменения маркировки позиций и правилами срабатывания переходов.

Функционирование сети Петри можно определить как процесс присвоения фишек позициям, количество и расположение которых будут меняться. Маркировка сети Петри определяется как отображение множества позиций  $P$  в множество неотрицательных целых чисел.

$$\mu : P \rightarrow N,$$

где  $i$  – метки,  $P$  – позиции,  $N$  – целые числа.

Маркировка сети Петри может быть определена как вектор  $M$ :

$$M = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_i, \dots, \mu_n),$$

где  $n = |P|$ , каждое  $\mu_i \in N, i = 1, \dots, n$ .

Маркированная сеть Петри представляет собой 5-кортеж  $(P, T, I, O, M)$ .

Зададим начальную маркировку сети Петри, структура которой рассмотрена в примере 1 на рисунке (рис. 1). Маркировка  $M_0 = (1, 1, 0, 0, 1)$  означает, что фишки поставлены в позициях 1, 2 и 5. Маркированная сеть Петри примет вид, показанный на рис. 3.

Работа сети осуществляется через активацию переходов. Предположим, что переход  $t_j$  имеет  $m_j$  входящих позиций и каждая из этих позиций содержит количество фишек, которое равно или превышает число дуг, которые соединяют позицию с переходом. Под активацией перехода подразумевают удаление всех разрешающих фишек из его входных позиций и добавление в каждую из выходных позиций

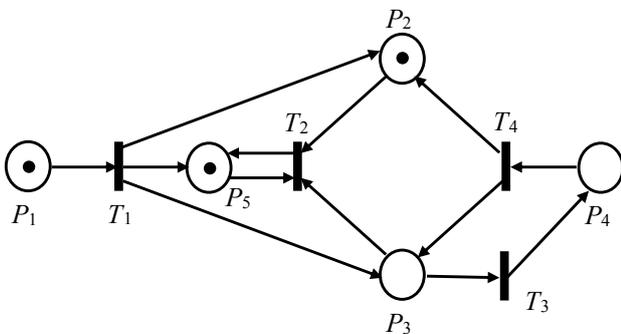


Рис. 3. Маркированная сеть Петри

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

фишек в количестве, которое равно числу дуг, ведущих от перехода.

Этот процесс будет осуществляться до тех пор, пока не останется ни одного разрешенного перехода, после чего функционирование сети прекращается.

Рассмотрим сеть Петри, заданную графически (рис. 4), начальная маркировка которой  $M_0 = (1, 1, 0, 0, 1)$ . Данная маркировка открывает только один переход –  $T_1$ .

Результатом запуска перехода  $T_1$  будет сеть с маркировкой (рис. 5).

Структура матрично-предикатного представления сетей Петри. Сеть Петри можно представить в виде блок-схемы (рис. 6).

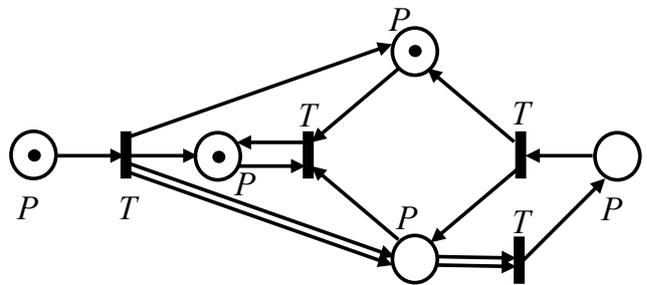


Рис. 4. Маркированная сеть Петри. Открыт переход  $T_1$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

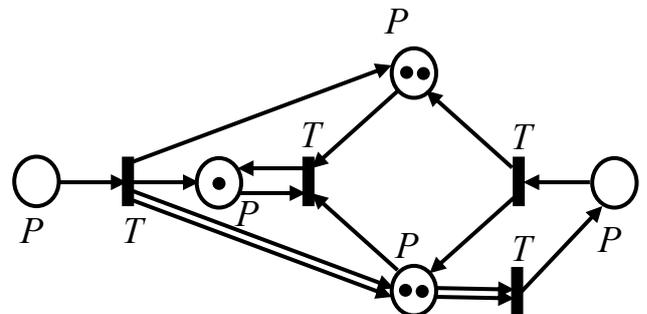


Рис. 5. Маркированная сеть Петри. Результат срабатывания перехода  $T_1$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

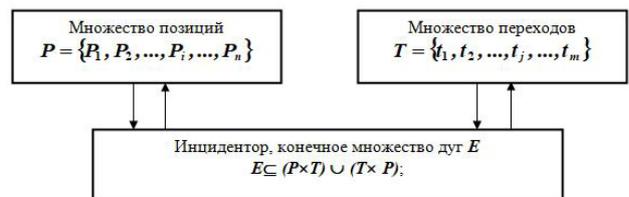


Рис. 6. Блок-схема сети Петри

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Сеть Петри является двудольным (направленным) мультиграфом  $G(A, E)$ , где  $A = P \cup T$  – множество вершин,

$E$  – инцидентор, задающий взаимосвязь вершин. Под этим понимаем связь между элементами, когда вершина инцидентна ребру.

Любой граф может быть представлен в матрично-предикатном виде. Представим матрицу этого графа  $G(A, E)$  в виде квадратной матрицы, состоящей из четырех частей (рис. 7).

$$M_{\Pi} = \left\| \begin{array}{c|c} P & E_{PT} \\ \hline E_{TP} & T \end{array} \right\|$$

Рис. 7. Матрица графа

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 7 приняты следующие обозначения:

$P = \|p_i\|$  – подматрица вершин-позиций;

$T = \|t_i\|$  – подматрица вершин-переходов;

$E_{PT} \subseteq (P \times T)$  – подматрица, представляющая часть инцидентора, описывающего переход из состояния позиций сети Петри в состояние переходов;

$E_{TP} \subseteq (T \times P)$  – подматрица, представляющая часть инцидентора, описывающего переход из состояния переходов сети Петри в состояние позиций.

Часть  $P$  матрицы  $M_{\Pi}$  (рис. 8) – это диагональная матрица, представляющая собой несвязный граф, который задает множество позиций сети Петри.

$$P = \|p_i\| = \left\| \begin{array}{cccccc} p1\_p1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & p2\_p2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & pi\_pi & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & pn\_pn \end{array} \right\|$$

Рис. 8. Диагональная матрица  $P$ , описывающая множество позиций сети Петри

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

С помощью этой части матрицы  $M_{\Pi}$  осуществляется маркировка сети Петри, которая осуществляется присвоением фишек  $i$  позициям (рис. 9).

Маркированная сеть Петри представляет собой 5-кортеж  $(P, T, I, O, M)$ .

$$P = \|p_i\| = \left\| \begin{array}{cccccc} p1\_p1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & p2\_p2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & pi\_pi & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & pn\_pn \end{array} \right\|$$

Рис. 9. Маркированная матрица  $P$ , описывающая позиции сети Петри

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Часть  $T$  матрицы  $M_{\Pi}$  (рис. 10) – это диагональная матрица, представляющая собой несвязный граф, который задает множество переходов сети Петри.

$$T = \|t_j\| = \left\| \begin{array}{cccccc} t1\_t1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & t2\_t2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & tj\_tj & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & tm\_tm \end{array} \right\|$$

Рис. 10. Диагональная матрица  $T$ , описывающая множество переходов сети Петри

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Часть  $E_{PT}$  матрицы  $M_{\Pi}$  (рис. 11) – это часть инцидентора, представляющая истинные значения предиката (диагональные элементы матрицы  $M_{\Pi}$  определяются трехместным предикатом  $P_i \mu_i P_i$  или  $T_j \mu_j T_j$ , а для задания недиагональных ненулевых элементов матрицы  $M_{\Pi}$  трехместный предикат доопределяется двумя местами, определяющими кратности дуг этих входов и выходов), который связывает конкретные позиции сети (матрица  $P$ ) с соответствующими переходами сети (матрица  $T$ ).

$$E_{PT} = \left\| \begin{array}{cccccc} p1\_t1 & p1\_t2 & \dots & p1\_tj & \dots & p1\_tm \\ p2\_t1 & p2\_p2 & \dots & p2\_tj & \dots & p2\_tm \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ pi\_t1 & pi\_t2 & \dots & pi\_tj & \dots & pi\_tm \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ pn\_t1 & pn\_t2 & \dots & pi\_tj & \dots & pn\_tm \end{array} \right\|$$

Рис. 11. Матрица  $E_{PT}$ , описывающая взаимодействие позиций и переходов сети Петри

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Часть  $E_{TP}$  матрицы  $M_{II}$  (рис. 12) – это часть инцидентора, представляющая истинные значения предиката, который связывает конкретные переходы сети (матрица  $T$ ) с соответствующими позициями сети (матрица  $P$ ).

$$E_{TP} = \begin{pmatrix} t_{1\_p1} & t_{1\_p2} & \dots & t_{1\_pi} & \dots & t_{1\_pm} \\ t_{2\_p1} & t_{2\_p2} & \dots & t_{2\_pi} & \dots & t_{2\_pm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{j\_p1} & t_{j\_p2} & \dots & t_{j\_pi} & \dots & t_{j\_pm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{m\_p1} & t_{m\_p2} & \dots & t_{m\_pi} & \dots & t_{m\_tm} \end{pmatrix}$$

Рис. 12. Матрица  $E_{TP}$ , описывающая взаимодействие переходов и позиций сети Петри

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Подставим в матрицу  $M_{II}$  значения частей  $P$ ,  $T$ ,  $E_{PT}$ ,  $E_{TP}$  и получим обобщенную матрицу, приведенную на рисунке (рис. 13).

В качестве примера использования эффективности нового представления сетей Пе-

три можно привести сложные многокомпонентные системы с десятками компонентов, функционирующих параллельно-последовательным образом. Это могут быть интеллектуальные системы управления движениями судов по системе каналов, выявления аварийных и предаварийных состояний на производственных линиях и в иных областях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная в работе методика представления сетей Петри позволяет существенно упростить работу с ними и использовать этот аппарат при построении сложных систем различного рода, представляющих собой совокупность последовательно и параллельно функционирующих компонентов, а также более эффективно работать с параллельными, асинхронными и недетерминированными процессами в проектируемых сложных системах.

$$M_{II} = \begin{pmatrix} P & E_{PT} \\ E_{TP} & T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{1\_p1} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & p_{1\_t1} & p_{1\_t2} & \dots & p_{1\_tj} & \dots & p_{1\_tm} \\ 0 & p_{2\_p2} & \dots & 0 & \dots & 0 & p_{2\_t1} & p_{2\_p2} & \dots & p_{2\_tj} & \dots & p_{2\_tm} \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & p_{i\_pi} & \dots & 0 & p_{i\_t1} & p_{i\_t2} & \dots & p_{i\_tj} & \dots & p_{i\_tm} \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & p_{n\_pn} & p_{n\_t1} & p_{n\_t2} & \dots & p_{n\_tj} & \dots & p_{n\_tm} \\ \dots & \dots \\ t_{1\_p1} & t_{1\_p2} & \dots & t_{1\_pi} & \dots & t_{1\_pn} & t_{1\_t1} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ t_{2\_p1} & t_{2\_p2} & \dots & t_{2\_pi} & \dots & t_{2\_pn} & 0 & t_{2\_t2} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ t_{j\_p1} & t_{j\_p2} & \dots & t_{j\_pi} & \dots & t_{j\_pn} & 0 & 0 & \dots & t_{j\_tj} & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ t_{m\_p1} & t_{m\_p2} & \dots & t_{m\_pi} & \dots & t_{m\_pn} & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & t_{m\_tm} \end{pmatrix}$$

Рис. 13. Матрица  $M_{II}$ , описывающая сеть Петри

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

### Список источников

1. Лескин А. А., Мальцев П. А., Спиридонов А. М. Сети Петри в моделировании и управлении. Л. : Наука, 1989. 133 с.
2. Bechhofer S., Goble C. Thesaurus construction through knowledge representation // *Data & Knowledge Engineering*. 2001. Vol. 37, no. 1. P. 25–45. [https://doi.org/10.1016/S0169-023X\(00\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S0169-023X(00)00052-5).
3. Лоу А. М., Кельтон В. Д. Имитационное моделирование. 3-е изд. / пер. с англ. СПб. : Питер, 2004. 847 с.

### References

1. Leskin A. A., Maltsev P. A., Spiridonov A. M. *Seti Petri v modelirovanii i upravlenii*. Leningrad: Nauka; 1989. 133 p. (In Russ.).
2. Bechhofer S., Goble C. Thesaurus construction through knowledge representation. *Data & Knowledge Engineering*. 2001;37(1):25–45. [https://doi.org/10.1016/S0169-023X\(00\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S0169-023X(00)00052-5).
3. Law A. M., Kelton W. D. *Simulation modeling and analysis*. 3rd ed., trans. St. Petersburg: Piter; 2004. 847 p. (In Russ.).

4. Тулохонова И. С., Отбоева С. Д. Решение частной задачи проектирования на основе сети Петри // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Том 8. № 4.
5. Маслаков М. П., Маслаков Д. П. Операции над сетями Петри // Физико-математические науки и информационные технологии: актуальные проблемы : материалы Междунар. заоч. науч.-практ. конф., 11 июня 2012 г., г. Новосибирск. Новосибирск : СибАК, 2012. С. 12–17.
6. Badouel E., Bernardinello L., Darondeau P. Petri net synthesis. Springer, 2015. 339 p.
7. Best E., Devillers R. Characterisation of the state spaces of marked graph Petri nets // Information and Computation. 2017. Vol. 253. Pt. 3. P. 399–410. <https://doi.org/10.1016/j.ic.2016.06.006>.
8. Schlachter U. Petri net synthesis for restricted classes of nets // Proceedings of the 37th International Conference “Petri Nets 2016”, June 19–24, 2016, Toruń. Toruń: Springer-Verlag, 2016. P. 79–97.
4. Tulokhonova I. S., Otboeva S. D. Solution of the private problem of design on the basis of the Petri network. *Naukovedenie*. 2016;8(4). (In Russ.).
5. Maslakov M. P., Maslakov D. P. Operatsii nad setyami Petri. In: *Proceedings of the International Research-to-Practice Conference “Fiziko-matematicheskie nauki i informatsionnye tekhnologii: aktualnye problemy”*, June 11, 2012, Novosibirsk. Novosibirsk: SibAK; 2012. p. 12–17. (In Russ.).
6. Badouel E., Bernardinello L., Darondeau P. Petri Net Synthesis. Springer; 2015. 339 p.
7. Best E., Devillers R. Characterisation of the state spaces of marked graph Petri nets. *Information and Computation*. 2017;253(3):399–410. <https://doi.org/10.1016/j.ic.2016.06.006>.
8. Schlachter U. Petri net synthesis for restricted classes of nets. In: *Proceedings of the 37th International Conference “Petri Nets 2016”*, June 19–24, 2016, Toruń. Toruń: Springer-Verlag; 2016. p. 79–97.

#### Информация об авторах

**В. С. Поляков** – кандидат технических наук, доцент;

<https://orcid.org/0009-0002-6006-1828>,  
vladstrix@mail.ru

**О. А. Авдеюк** – кандидат технических наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0001-6201-8773>,  
oxal2@mail.ru✉

**Р. Н. Никулин** – кандидат физико-математических наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0002-9042-7985>,  
nikulin\_rn@mail.ru

#### About the authors

**V. S. Polyakov** – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;

<https://orcid.org/0009-0002-6006-1828>,  
vladstrix@mail.ru

**O. A. Avdeyuk** – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;

<https://orcid.org/0000-0001-6201-8773>,  
oxal2@mail.ru✉

**R. N. Nikulin** – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;

<https://orcid.org/0000-0002-9042-7985>,  
nikulin\_rn@mail.ru

Научная статья

УДК 658.8.027:004.438Java Swing + 658.77:004.438Java Swing

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-9>



## Автоматизация учета вин: проектирование и реализация информационной системы на Java Swing

**Сергей Сергеевич Романов<sup>✉</sup>, Дмитрий Юрьевич Зорькин,  
Наталья Владимировна Клячина**

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия*

**Аннотация.** Статья посвящена проектированию и реализации информационной системы для автоматизации учета поставок и продаж вин, ориентированной на малый и средний бизнес. На основе анализа существующих решений предложена архитектура, сочетающая клиент-серверную модель с использованием Java Swing для создания интуитивно понятного графического интерфейса. Система обеспечивает управление данными о винах, закупках, продажах и складских запасах, а также генерацию аналитических отчетов. Особенностью решения является хранение данных в текстовых файлах, что упрощает развертывание и эксплуатацию без необходимости интеграции сложных систем управления базами данных. В работе детально рассмотрены этапы разработки: проектирование базы данных, реализация бизнес-логики, тестирование интерфейса и функциональности. Результатом стала стабильно работающая система, готовая к масштабированию за счет перехода на реляционные базы данных или интеграции с другими бизнес-инструментами. Данная работа будет особенно полезна разработчикам, изучающим Java Swing, а также предпринимателям, стремящимся оптимизировать и автоматизировать учетные процессы. Представленная система наглядно показывает, как тщательно выстроенный подход к бизнес-логике и проектированию базы данных – в сочетании с удобным интерфейсом – способен существенно повысить прозрачность деятельности и эффективность принятия решений.

**Ключевые слова:** автоматизация учета, Java Swing, информационная система, управление поставками, управление продажами, складской учет, малые и средние предприятия, генерация отчетов, бизнес-логика, база данных

**Для цитирования:** Романов С. С., Зорькин Д. Ю., Клячина Н. В. Автоматизация учета вин: проектирование и реализация информационной системы на Java Swing // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 3. С. 79–90. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-9>.

Original article

## Wine accounting automation: Information system design and implementation using Java Swing

**Sergey S. Romanov<sup>✉</sup>, Dmitry Yu. Zorkin, Natalya V. Klyachina**  
*Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia*

**Abstract.** The article focuses on designing and implementing an information system. It automates the accounting of wine supplies and sales for small and medium businesses. The author proposes an architecture based on the analysis of existing solutions that combines a client-server model with Java Swing to create an intuitive graphical interface. Generating analytical reports, the system manages data related to wines, supplies, sales, and stocks. The peculiarity of the solution is data storage in text files, which simplifies implementation and maintenance without integrating complex database management systems. A detailed review of the development stages is provided in this study: database design, business logic implementation, and testing of the interface and functionality. The result is a consistently working system, ready for scaling through switching

to relational databases or integration with other business tools. This paper provides assistance to developers learning Java Swing and to entrepreneurs focused on optimizing and automating accounting procedures. The proposed system demonstrates that a thorough approach to business logic and database design, combined with a user-friendly interface, significantly improves business transparency and decision-making.

**Keywords:** accounting automation, Java Swing, information system, supply management, sales management, inventory control, small and medium enterprises, report generation, business logic, database

**For citation:** Romanov S. S., Zorkin D. Yu., Klyachina N. V. Wine accounting automation: Information system design and implementation using Java Swing. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(3):79–90. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-9>.

## ВВЕДЕНИЕ

Современная эпоха информационных технологий, безусловно, оказывает трансформирующее воздействие на широкий спектр бизнес-сфер, существенно повышая эффективность и радикально меняя методы ведения учета и управления бизнес-процессами. В частности, автоматизация процессов снабжения и реализации товаров оказывается одним из ключевых факторов оптимизации всей цепочки деятельности предприятия – от логистики и складского учета до итогового взаимодействия с клиентами.

Необходимость интеграции инновационных решений в торговлю и смежные процессы учета, анализа и планирования, очевидно, связана со стремлением к уменьшению издержек, расширению контроля над товарными потоками, повышению точности всех операций и ускорению обработки данных. Для винной индустрии, где каждый этап управления запасами требует высочайшей точности, гибкости в расчетах и быстрой адаптации к динамично меняющимся рыночным условиям, разработка специализированных информационных систем автоматизации учета поставок и продаж представляется особенно актуальной.

Следовательно, одной из приоритетных задач отрасли является создание решений, способствующих росту качества обслуживания, ускорению документальных процедур и точному контролю на каждом этапе – от закупки и хранения вина до его продажи и передачи конечному покупателю. В этой связи на рынке формируется явный спрос на специализированные приложения для компаний малого и среднего бизнеса, которые стремятся опти-

мизировать и автоматизировать операционные процессы в сфере торговли алкогольными напитками.

Безусловно, важным аспектом разработки подобных систем становится возможность их масштабирования и легкой адаптации к меняющимся бизнес-процессам. В условиях постоянной вариативности спроса и предложения доступность актуальной информации о запасах вина, сделках с поставщиками и покупателями в режиме реального времени позволяет обеспечить прозрачность на всех этапах – от формирования заказа до конечной реализации. Настоящая работа посвящена созданию подобной системы, которая будет ориентирована в первую очередь на предприятия, нуждающиеся в оптимизации процессов торговли алкогольной продукцией.

Основной целью данной курсовой работы является формирование информационной системы для автоматизации учета закупок и продаж вин, обеспечивающей:

- полный цикл учета товарных операций (закупки и реализации) с возможностью оперативного обновления и корректировок данных;
- эффективное управление складскими запасами с учетом поступлений и продаж;
- формирование разнообразной отчетности, отражающей как объемы проданных товаров и географические характеристики продаж, так и текущее состояние запасов;
- полноценный функционал для ввода, редактирования и удаления данных о винах, поставщиках, покупателях и складах;
- генерацию отчетов о динамике продаж, статистике по конкретным позициям вин, со-

стоянии запасов на складах и иных показателях, важных для углубленного анализа.

Для реализации поставленных целей будет использован язык программирования Java, благодаря которому достигается необходимая гибкость и высокая степень взаимодействия с базой данных. Безусловно, Java предоставляет все требуемые инструменты для создания клиент-серверных приложений с удобным графическим интерфейсом, что дает возможность построить надежную и эргономичную платформу для работы конечных пользователей.

Таким образом, в ходе выполнения курсовой работы предполагается решение ряда важнейших задач.

1. Проектирование структуры базы данных, включающей сведения о поставках, продажах, наименованиях вин, контрагентах и покупателях.

2. Разработка пользовательского интерфейса, позволяющего легко вносить, редактировать и удалять необходимые данные.

3. Реализация бизнес-логики, охватывающей операции с данными (добавление, удаление, корректировка записей), а также расчеты себестоимости, формирование итоговых показателей по закупкам и продажам.

4. Тестирование разработанной системы, выявление и устранение возможных ошибок, оптимизация производительности и повышение безопасности.

5. Создание модулей для формирования отчетных документов, в том числе по продажам, учету складских запасов, статистике по винам и поставкам.

Объектом исследования выступает интегрированная информационная система, предназначенная для автоматизации учета винных поставок и продаж, которую составляют база данных, пользовательский интерфейс и бизнес-логика обработки данных. Предметом исследования является методология проектирования и реализации такого программного комплекса, включающего управление запасами, контроль закупок и продаж, а также формирование аналитической отчетности для последующего принятия управленческих решений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Стоит отметить, что представленные научные труды в совокупности затрагивают все фундаментальные элементы, характерные для разработки современных информационных систем, включая принципы объектно-ориентированного программирования (ООП) и основные аспекты программной инженерии. Рассмотрим их вклад исходя из специфики данного исследования, направленного на создание системы автоматизации учета поставок и продаж вин с использованием технологии Java Swing.

Так, работы Л. А. Мацяшека и Б. Л. Лионга очевидно предлагают методологическую основу для разработки программных продуктов, уделяя особое внимание управлению требованиями и тестированию на разных стадиях жизненного цикла проекта [1]. Подобный подход позволяет грамотно структурировать этапы создания программной системы, а также обеспечивает систематическое документирование процессов.

Далее, в исследовании Е. А. Гафаровой подчеркивается важность креативного компонента при работе с информационными системами, в особенности при анализе пользовательского опыта. Предлагаемые ею методики оказываются крайне полезны для формирования интуитивно понятного интерфейса, что имеет первостепенное значение при разработке приложений на основе Java Swing [2].

Кроме того, следует отметить материалы Г. Рика, где в доступной форме изложены базовые концепции ООП – инкапсуляция, наследование и полиморфизм [3]. Несмотря на их универсальный характер, данные принципы позволяют сформировать четкую структуру классов и служат методологической опорой при проектировании архитектуры программного обеспечения.

Таким образом, проанализированные источники формируют целостное представление о классических принципах ООП, а также демонстрируют современные технологии и подходы, применимые к разработке информационных систем. В совокупности они

подчеркивают научную валидность и высокую практическую значимость исследуемой темы, создавая прочную основу для дальнейшей реализации проекта по автоматизации учета поставок и продаж вин [4, 5, 6].

Проектирование базы данных, несомненно, играет ключевую роль в создании надежной и масштабируемой информационной системы. В рамках данного исследования был выбран текстовый формат хранения данных, что обеспечивает упрощенный доступ к файлам и упрощает процедуры обновления и резервного копирования. При этом каждая категория данных располагается в отдельном текстовом файле, позволяя проводить независимую модификацию отдельных модулей системы без риска нарушения целостности остальных элементов.

Структура данных, хранимая в текстовых файлах, была спроектирована с учетом рекомендаций по работе с Hibernate [7]. Данный подход, хотя и предполагает традиционно реляционное хранение данных, вдохновил автора на создание логической модели, которая сохраняет идею гибких маппингов и обеспе-

чивает потенциал для дальнейшего масштабирования. На практике это означает, что форматы хранения и идентификаторы записей могут быть легко расширены или изменены, не нарушая общую архитектуру приложения.

Так, в файле Wines.txt размещаются исчерпывающие сведения о винах, включая:

- уникальный идентификатор;
- бренд;
- тип и сорт вина;
- страну происхождения;
- дату розлива;
- содержание алкоголя;
- данные о поставщике;
- закупочную и продажную стоимость.

Вся эта информация впоследствии используется для вычисления ключевых показателей системы, а также формирования аналитической отчетности. На рис. 1 представлена примерная структура записи, отражающая формат данных, применяемый при хранении сведений о винах. Благодаря этому подходу достигается оптимальный баланс между простотой реализации и возможностью масшта-

```
Wines.txt x
1 ID;Brand;Type;Variety;Origin;BottlingDate;AlcoholContent;SupplierID;PurchasePrice;SalePrice|
2 W001;Château Margaux;Red;Cabernet Sauvignon;France;15.10.2015;13.5;SUP001;150.0;250.0
3 W002;Barolo DOCG;Red;Nebbiolo;Italy;20.05.2018;14.0;SUP002;80.0;140.0
4 W003;Dom Pérignon;Sparkling;Chardonnay;France;01.01.2012;12.5;SUP003;200.0;350.0
5 W004;Sassicaia;Red;Cabernet Sauvignon;Italy;10.07.2017;13.8;SUP004;120.0;220.0
6 W005;Vega Sicilia;Red;Tempranillo;Spain;05.03.2016;14.2;SUP005;90.0;180.0
7 W006;Penfolds Grange;Red;Shiraz;Australia;12.12.2014;14.5;SUP006;250.0;400.0
8 W007;Cloudy Bay;White;Sauvignon Blanc;New Zealand;08.08.2020;12.0;SUP007;30.0;60.0
9 W008;Château d'Yquem;Dessert;Sémillon;France;25.09.2010;13.5;SUP008;300.0;500.0
10 W009;Opus One;Red;Blend;USA;15.06.2019;14.3;SUP009;180.0;300.0
11 W010;Concha y Toro;Red;Carménère;Chile;03.04.2021;13.0;SUP010;20.0;40.0
12 W011;Château Lafite Rothschild;Red;Cabernet Sauvignon;France;05.05.2013;13.0;SUP001;500.0;850.0
13 W012;Brunello di Montalcino;Red;Sangiovese;Italy;18.07.2015;14.5;SUP002;110.0;200.0
14 W013;Moët & Chandon;Sparkling;Pinot Noir;France;22.11.2018;12.0;SUP003;70.0;130.0
15 W014;Amarone della Valpolicella;Red;Corvina;Italy;30.09.2016;15.0;SUP004;130.0;240.0
16 W015;Ribera del Duero;Red;Tempranillo;Spain;14.02.2017;14.0;SUP005;85.0;160.0
17 W016;Jacob's Creek;White;Riesling;Australia;09.10.2019;11.5;SUP006;15.0;30.0
18 W017;Kim Crawford;White;Sauvignon Blanc;New Zealand;12.03.2021;12.5;SUP007;25.0;45.0
19 W018;Tokaji Aszú;Dessert;Furmint;Hungary;07.08.2014;12.0;SUP008;180.0;320.0
20 W019;Silver Oak;Red;Cabernet Sauvignon;USA;25.12.2018;14.2;SUP009;200.0;350.0
21 W020;Santa Rita;Red;Merlot;Chile;01.01.2020;13.5;SUP010;18.0;35.0
```

Рис. 1. Пример файла базы данных  
Примечание: составлено авторами.

бирования, что имеет большое значение для дальнейшего развития системы.

При проектировании системы хранения данных в формате текстовых файлов был реализован принцип тематической декомпозиции, что позволило распределить информацию по нескольким независимым файлам в соответствии с их функциональным назначением. Такой подход обеспечивает удобство сопровождения и обновления данных, а также повышает прозрачность бизнес-процессов с учетом современных требований к информационным системам.

В данном файле Purchases.txt аккумулируются все сведения о совершенных закупках, включая:

- уникальный идентификатор заказа;
- поставщика, у которого приобретаются вина;
- перечень наименований вин и соответствующее количество для каждого вида;
- адрес, по которому осуществляется доставка товара;
- итоговую сумму закупки;
- дату оформления заказа.

Собранные данные используются при формировании аналитических отчетов о затратах и управлении запасами, а также служат базой для расчета финансовой эффективности закупочной деятельности.

Файл SalesOrders.txt, содержащий информацию о продажах, призван обеспечить контроль реализации товаров и расчеты по доходной части. В нем сохраняются:

- уникальный идентификатор заказа;
- данные о покупателе;
- сведения о наименованиях вин и требуемом количестве;
- адрес склада, с которого осуществляется отгрузка;
- адрес доставки товара;
- общая сумма заказа.

Эти данные критически важны при формировании отчетности о выручке, отслеживании динамики спроса и оптимизации складских запасов для поддержания стабильного уровня обслуживания клиентов.

Файл Warehouses.txt, посвященный учету складских объектов, включает:

- адрес склада;
- показатель вместимости (максимально допустимый запас товаров);
- текущее количество хранящихся единиц вина (запас).

Хранение данных о складах в отдельном файле упрощает процедуру оперативного обновления статуса складских остатков и позволяет быстро реагировать на изменения потребительского спроса.

Таким образом, разделение информации по файлам Purchases.txt, SalesOrders.txt и Warehouses.txt обеспечивает высокую степень согласованности в системе хранения данных, облегчает управление этими данными и позволяет эффективно масштабировать решение по мере роста потребностей предприятия.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

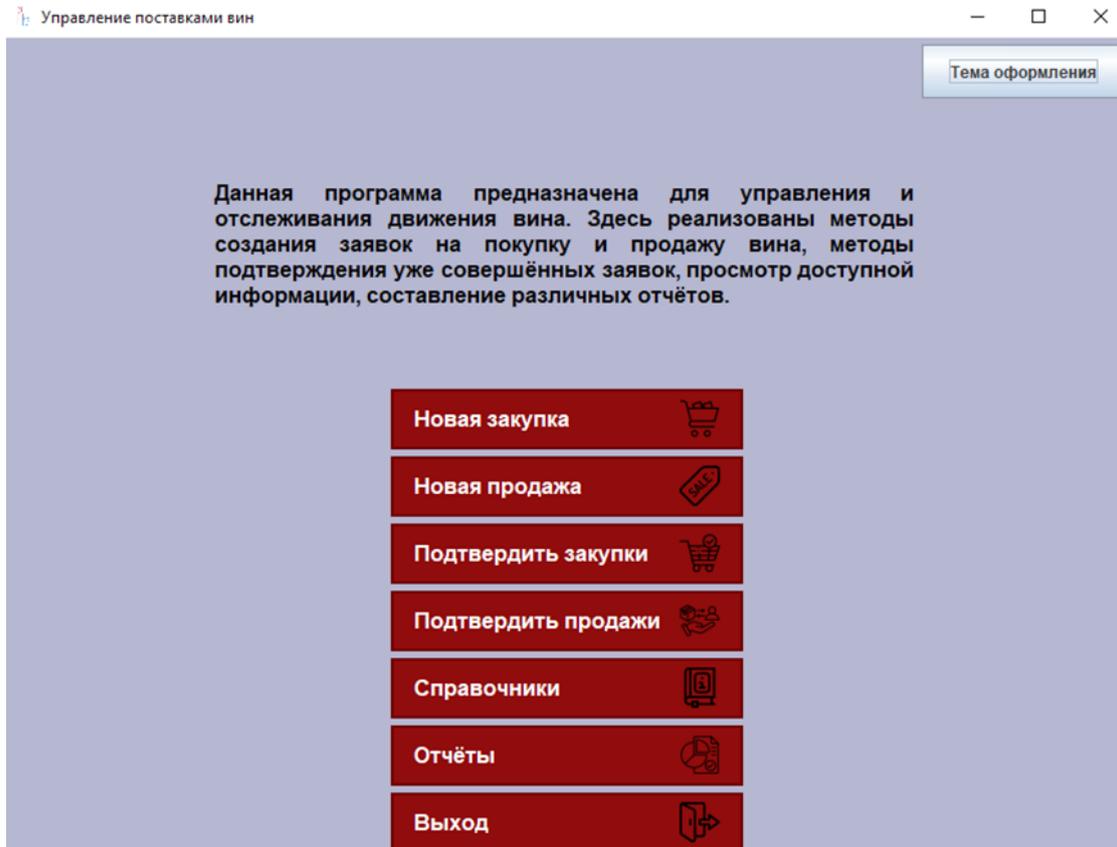
При создании пользовательского интерфейса программы было решено опираться на официальную документацию по Java Swing [8], поскольку она предоставляет обширный набор компонентов и гибкий инструментарий для разработки настольных приложений с богатым графическим интерфейсом. В рамках этого подхода был реализован главный экран приложения, который служит точкой входа в систему и обеспечивает быстрый доступ к основным функциональным модулям.

Данный экран (рис. 2 и 3) содержит верхнюю панель управления с кнопками, предназначенными для навигации по различным разделам программы.

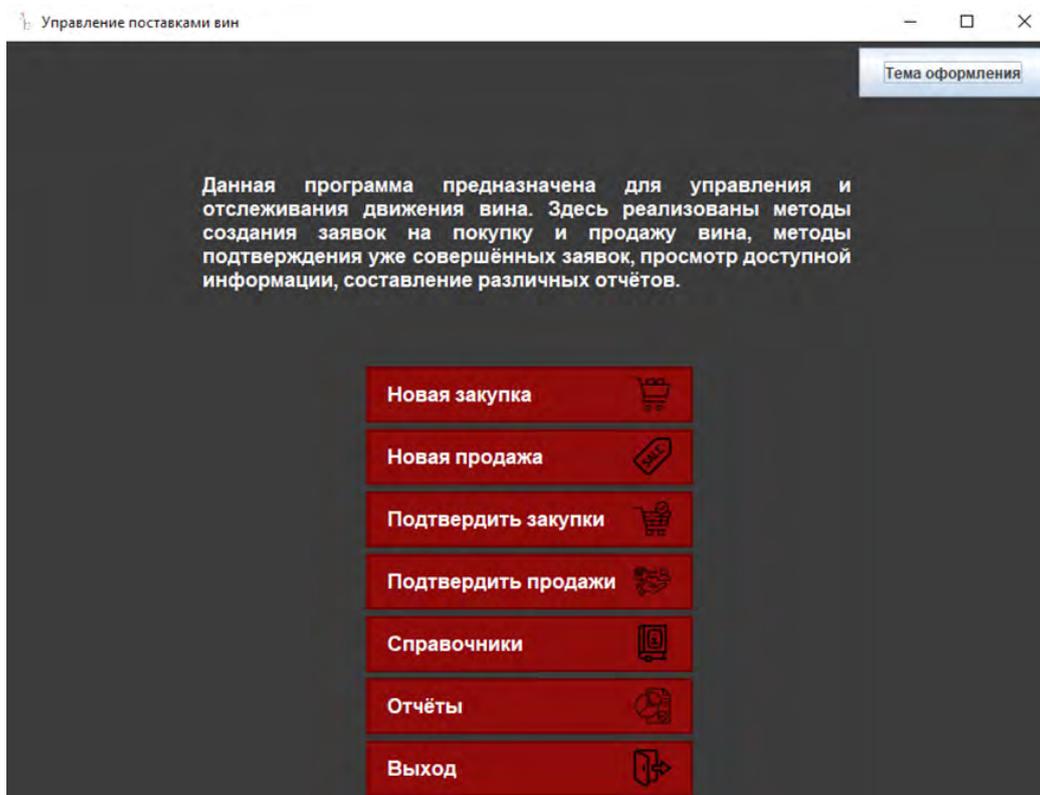
1. Закупки – переход к разделу для оформления и просмотра информации о закупках (поставках).

2. Продажи – доступ к функционалу, связанному с оформлением заказов покупателей и контролем продаж.

3. Отчеты – формирование и просмотр аналитических данных по запасам, продажам, динамике спроса.



**Рис. 2. Главное окно, светлая тема**  
Примечание: составлено авторами.



**Рис. 3. Главное окно, темная тема**  
Примечание: составлено авторами.

4. Справочники – редактирование справочной информации о винах, поставщиках, покупателях и складах.

Реализация подобной структуры интерфейса согласуется с принципами удобства и единообразия (концепция «unified interface») и позволяет пользователям быстро переключаться между основными функциями системы, минимизируя время на освоение и сокращая риск ошибок при работе. Такой подход способствует повышению эффективности, что особенно важно для сотрудников, ежедневно взаимодействующих с системой в условиях интенсивного оборота информации.

Окно для управления вином (рис. 4) является одной из ключевых форм в системе, обеспечивающей полноценное редактирование базы данных о винах. Оно предоставляет пользователю удобный механизм для добавления новых наименований, внесения изменений в существующие записи и удаления неактуальных позиций. В интерфейсе данной формы предусмотрены поля, позволяющие ввести и скорректировать все важные характеристики вина, в том числе:

– наименование и бренд;

– сорт и тип;

– страна происхождения;

– дата розлива;

– содержание алкоголя;

– цена закупки и цена продажи.

Подобная гибкая структура ввода данных способствует поддержанию актуальности сведений о винной продукции и облегчает аналитическую обработку информации. Кроме того, применение принципов объектно-ориентированного программирования упрощает интеграцию бизнес-логики, отвечающей за обработку изменений в карточке вина, с другими модулями системы.

Окно для управления заказами (рис. 5–9) представляет собой ключевой элемент приложения, обеспечивающий интерактивное оформление продаж. Его функционал предусматривает выбор покупателя из списка зарегистрированных клиентов, указание конкретного вина (с учетом ассортимента), а также выбор соответствующего склада и требуемого количества. При подтверждении операции система автоматически обновляет сведения о заказах в общем списке и в режиме реального времени корректирует текущие складские запасы, отражая фактическое состояние запасов.



ID	Бренд	Тип	Сорт	Происхождение	Дата розлива	Алк. %	Поставщик	Цена зак.	Цена прод.
W001	Château Marga...	Red	Cabernet Sauvi...	France	15.10.2015	13.5	SUP001	150.0	250.0
W002	Barolo DOCG	Red	Nebbiolo	Italy	20.05.2018	14.0	SUP002	80.0	140.0
W003	Dom Pérignon	Sparkling	Chardonnay	France	01.01.2012	12.5	SUP003	200.0	350.0
W004	Sassicaia	Red	Cabernet Sauvi...	Italy	10.07.2017	13.8	SUP004	120.0	220.0
W005	Vega Sicilia	Red	Tempranillo	Spain	05.03.2016	14.2	SUP005	90.0	180.0
W006	Penfolds Grange	Red	Shiraz	Australia	12.12.2014	14.5	SUP006	250.0	400.0
W007	Cloudy Bay	White	Sauvignon Blanc	New Zealand	08.08.2020	12.0	SUP007	30.0	60.0
W008	Château d'Yqu...	Dessert	Sémillon	France	25.09.2010	13.5	SUP008	300.0	500.0
W009	Opus One	Red	Blend	USA	15.06.2019	14.3	SUP009	180.0	300.0
W010	Concha y Toro	Red	Carménère	Chile	03.04.2021	13.0	SUP010	20.0	40.0
W011	Château Lafite ...	Red	Cabernet Sauvi...	France	05.05.2013	13.0	SUP001	500.0	850.0
W012	Brunello di Mon...	Red	Sangiovese	Italy	18.07.2015	14.5	SUP002	110.0	200.0
W013	Moët & Chandon	Sparkling	Pinot Noir	France	22.11.2018	12.0	SUP003	70.0	130.0
W014	Amarone della ...	Red	Corvina	Italy	30.09.2016	15.0	SUP004	130.0	240.0
W015	Ribera del Duero	Red	Tempranillo	Spain	14.02.2017	14.0	SUP005	85.0	160.0
W016	Jacob's Creek	White	Riesling	Australia	09.10.2019	11.5	SUP006	15.0	30.0
W017	Kim Crawford	White	Sauvignon Blanc	New Zealand	12.03.2021	12.5	SUP007	25.0	45.0
W018	Tokaji Aszú	Dessert	Furmint	Hungary	07.08.2014	12.0	SUP008	180.0	320.0
W019	Silver Oak	Red	Cabernet Sauvi...	USA	25.12.2018	14.2	SUP009	200.0	350.0
W020	Santa Rita	Red	Merlot	Chile	01.01.2020	13.5	SUP010	18.0	35.0

Рис. 4. Окно справочников

Примечание: составлено авторами.

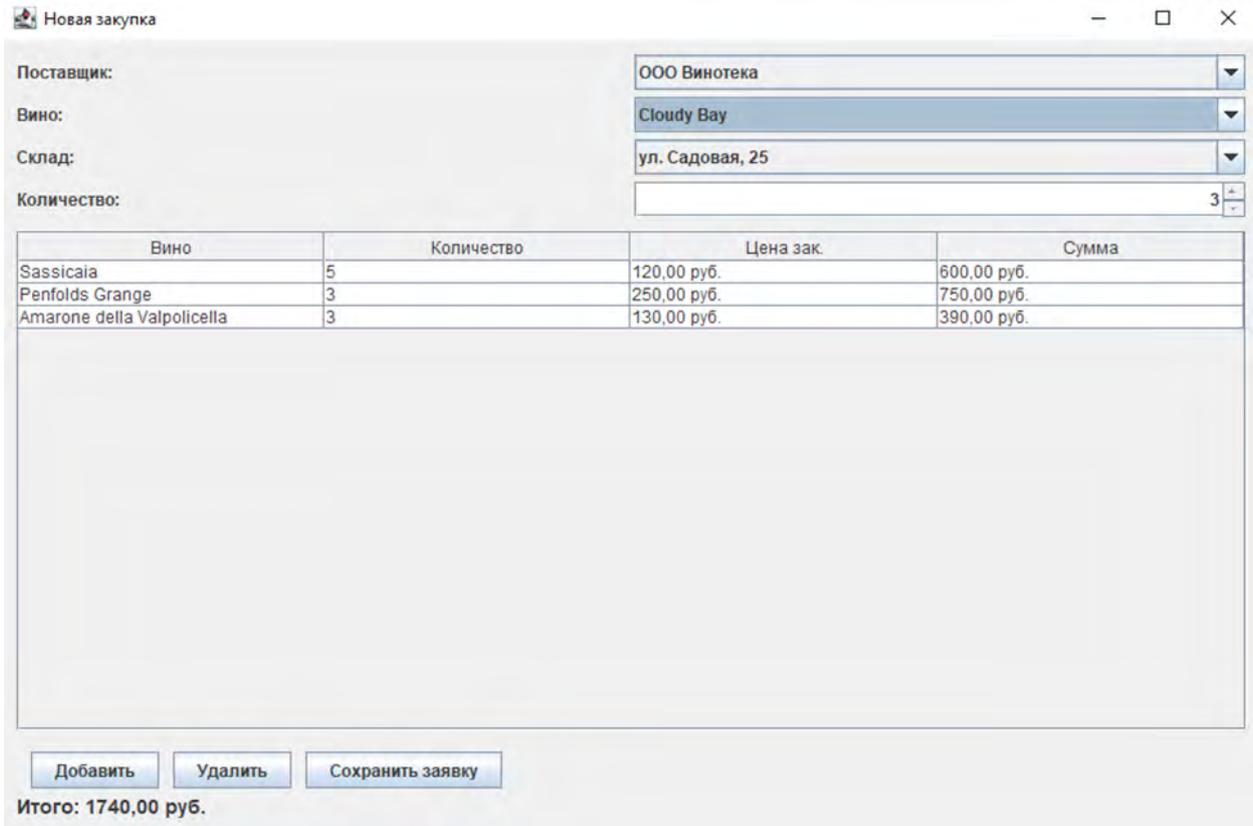


Рис. 5. Окно оформления заявки на закупку  
Примечание: составлено авторами.

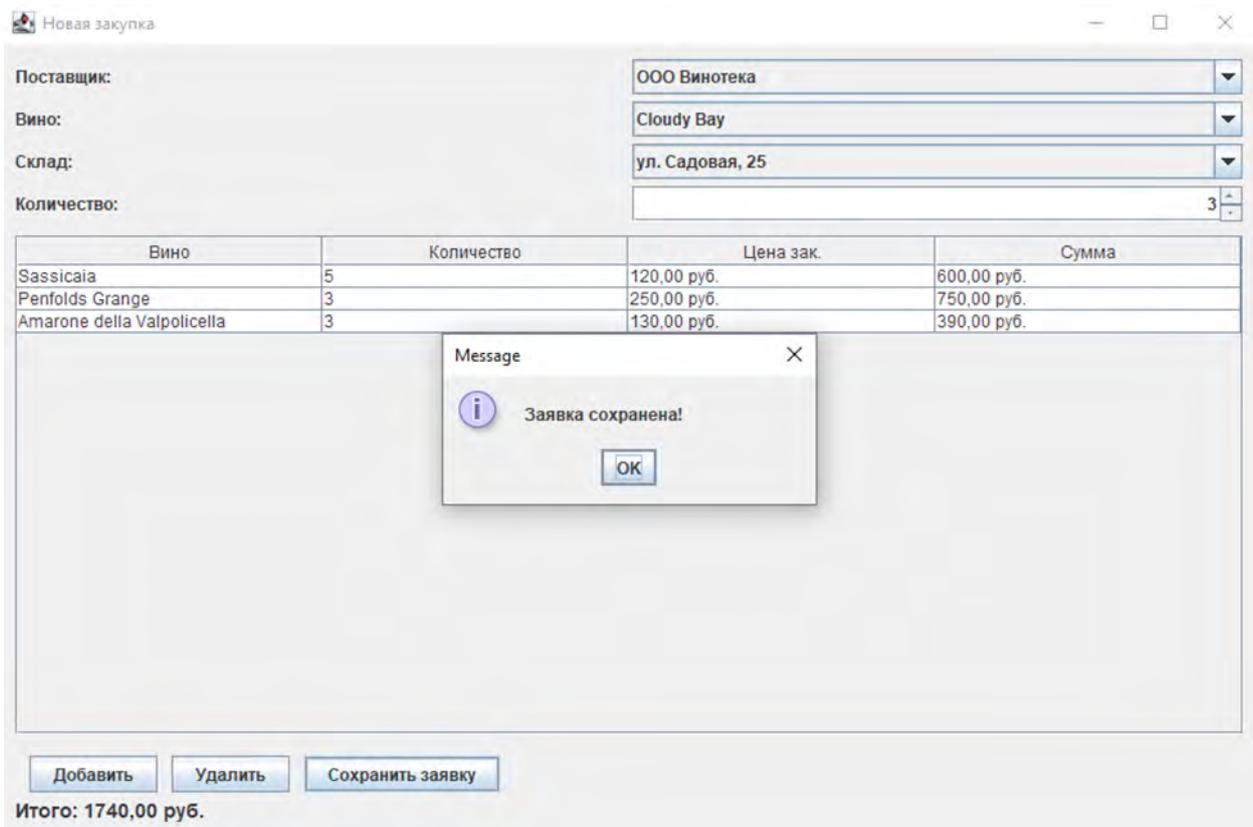
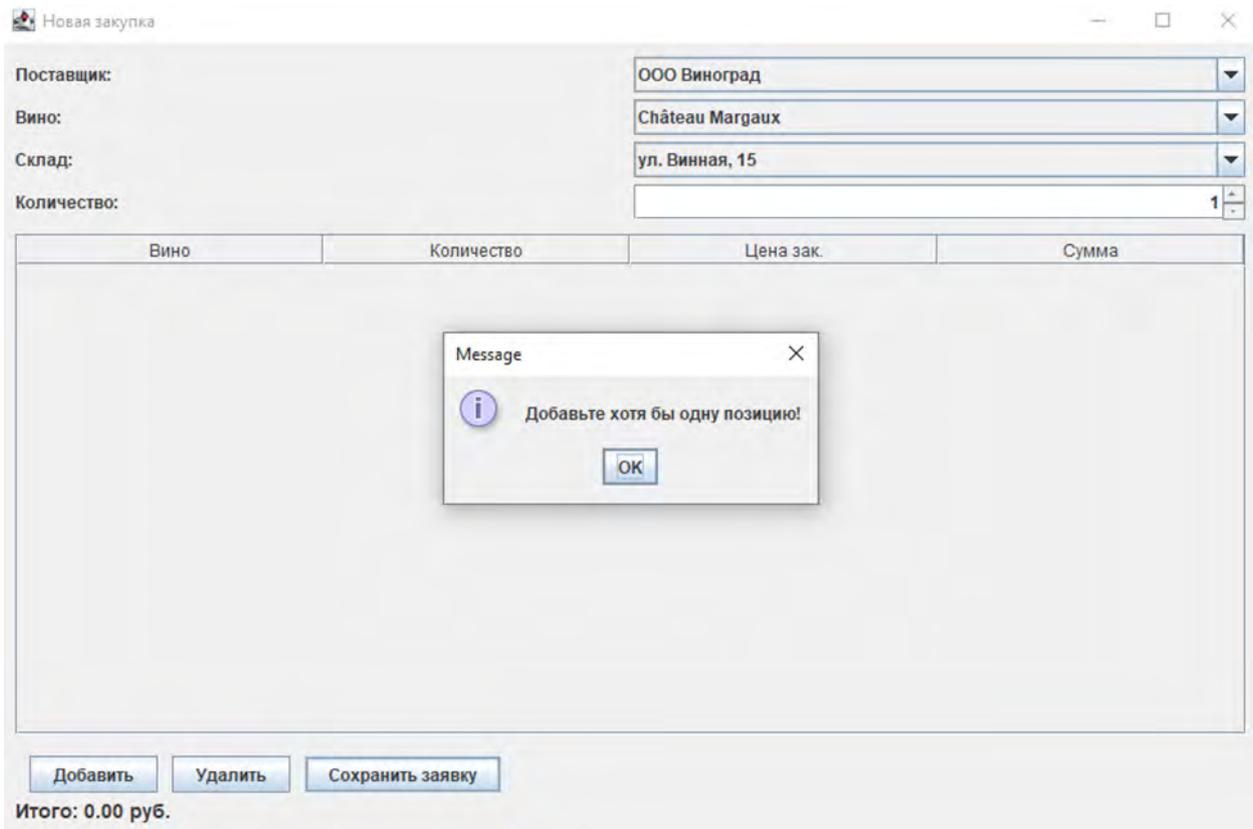


Рис. 6. Сообщение об успешном оформлении  
Примечание: составлено авторами.



**Рис. 7. Обработка ошибки сохранения заявки без позиций**

Примечание: составлено авторами.

ID заказа	Поставщик	Сумма	Дата заказа
PO-001	SUP001	2000,00 руб.	2023-10-01
PO-002	SUP002	2560,00 руб.	2023-10-02
PO-003	SUP003	3450,00 руб.	2023-10-03
PO-004	SUP004	1290,00 руб.	2023-10-04
PO-005	SUP005	1980,00 руб.	2023-10-05
PO-006	SUP006	3100,00 руб.	2023-10-06
PO-007	SUP007	960,00 руб.	2023-10-07
PO-008	SUP008	2250,00 руб.	2023-10-08
PO-009	SUP009	3850,00 руб.	2023-10-09
PO-010	SUP010	1080,00 руб.	2023-10-10
PO-011	SUP001	2550,00 руб.	2023-10-11
PO-013	SUP003	3150,00 руб.	2023-10-13
PO-014	SUP004	1560,00 руб.	2023-10-14
PO-015	SUP005	2970,00 руб.	2023-10-15
PO-016	SUP006	2130,00 руб.	2023-10-16
PO-017	SUP007	810,00 руб.	2023-10-17
PO-018	SUP008	2450,00 руб.	2023-10-18
PO-019	SUP009	2750,00 руб.	2023-10-19
PO-020	SUP010	1890,00 руб.	2023-10-20
PO-1738521089799	SUP007	1740,00 руб.	2025-02-02

**Рис. 8. Окно подтверждения закупок**

Примечание: составлено авторами.

ID заказа	Поставщик	Сумма	Дата заказа
PO-001	SUP001	2000,00 руб.	2023-10-01
PO-002	SUP002	2560,00 руб.	2023-10-02
PO-003	SUP003	3450,00 руб.	2023-10-03
PO-004	SUP004	1290,00 руб.	2023-10-04
PO-005	SUP005	1980,00 руб.	2023-10-05
PO-006	SUP006		2023-10-06
PO-007	SUP007		2023-10-07
PO-008	SUP008		2023-10-08
PO-009	SUP009		2023-10-09
PO-010	SUP010		2023-10-10
PO-011	SUP001		2023-10-11
PO-013	SUP003		2023-10-13
PO-014	SUP004		2023-10-14
PO-015	SUP005	2970,00 руб.	2023-10-15
PO-016	SUP006	2130,00 руб.	2023-10-16
PO-017	SUP007	810,00 руб.	2023-10-17
PO-018	SUP008	2450,00 руб.	2023-10-18
PO-019	SUP009	2750,00 руб.	2023-10-19
PO-020	SUP010	1890,00 руб.	2023-10-20

Подтвердить выбранное

**Рис. 9. Сообщение о подтверждении последней совершенной закупки**  
 Примечание: составлено авторами.

Подобная автоматизация существенно сокращает риск возникновения ошибок, связанных с ручным вводом данных, и позволяет пользователям осуществлять контроль за коммерческими процессами в удобном интерфейсе. Кроме того, проработка валидации полей и соблюдение принципов ООП обеспечивают надежную логику взаимодействия между экранными формами и внутренней бизнес-логикой системы, что способствует повышению эффективности продаж и прозрачности всех операций.

Окно отчетности (рис. 10) является важным элементом системы, позволяющим пользователю оперативно формировать различные аналитические сводки. В данном модуле ре-

ализована форма, которая предоставляет гибкие настройки для выбора параметров формирования отчетов, включая период (даты начала и конца), конкретное наименование вина или иные фильтры, связанные с продажами, закупками и текущими остатками на складах.

Пользователь может, например, получить данные об объемах продаж за указанный промежуток времени, отследить динамику закупок у определенного поставщика или проанализировать остатки популярных вин для дальнейшего планирования поставок. Таким образом, благодаря механизму фильтрации и наглядной визуализации данное окно помогает принимать информирован-

Дата	Вино	Количество	Сумма
03.10.2023	W005.W007	8.2	960.00 руб.
04.10.2023	W006.W008	7.5	2250.00 руб.
05.10.2023	W009.W010	3.9	1980.00 руб.
06.10.2023	W011.W012	10.4	3100.00 руб.
07.10.2023	W013.W014	6.6	960.00 руб.
08.10.2023	W015.W016	15.1	2250.00 руб.
09.10.2023	W017.W018	7.1	3850.00 руб.
10.10.2023	W019.W020	9.6	1080.00 руб.
11.10.2023	W001.W002	14.3	2550.00 руб.
12.10.2023	W003.W004	10.7	2840.00 руб.
13.10.2023	W005.W006	18.5	3150.00 руб.
14.10.2023	W007.W008	2.1	1560.00 руб.
15.10.2023	W009.W010	11.8	2970.00 руб.
16.10.2023	W011.W012	15.9	2130.00 руб.
17.10.2023	W013.W014	7.4	810.00 руб.
18.10.2023	W015.W016	13.2	2450.00 руб.
19.10.2023	W017.W018	15.1	2750.00 руб.
20.10.2023	W019.W020	13.7	1890.00 руб.

**Рис. 10. Сообщение о подтверждении последней совершенной закупки**  
 Примечание: составлено авторами.

ные управленческие решения и осуществлять своевременный контроль над ключевыми бизнес-процессами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была разработана информационная система, ориентированная на автоматизацию учета поставок и продаж вин. Следует отметить, что применяемая архитектура, основанная на хранении данных в текстовых файлах, демонстрирует простоту развертывания и эксплуатации, поскольку не требует установки специализированной системы управления базами данных. Такой подход, безусловно, удобен для небольших и средних предприятий, стремящихся наладить контроль над движением товарных запасов без избыточных временных и финансовых затрат.

Основные результаты, полученные в ходе исследования:

1. Проектирование структуры базы данных на основе текстовых файлов. Разработаны файлы, содержащие ключевые сведения о винах, поставках, заказах и складах. Данная схема хранения продемонстрировала свою эффективность при небольших объемах информации, обеспечив гибкость и простоту обновления данных.

2. Реализация пользовательского интерфейса с применением Java Swing. Благодаря использованию богатых возможностей Java Swing была создана интуитивно понятная оболочка для взаимодействия с системой. Это позволило пользователям быстро ориентироваться в функционале приложения и выполнять требуемые операции (добавление, редактирование и удаление записей) с минимальными усилиями.

3. Реализация бизнес-логики. Система предоставляет пользователю инструменты для управления всеми ключевыми сущностями: от ввода данных о новых поставках и формировании заказов до учета складских остатков и генерации отчетных документов. Такой комплексный функционал дает возможность контролировать основные аспекты

процесса торговли вином в режиме реального времени.

В ходе проектирования и разработки особое внимание уделялось созданию удобного интерфейса и корректной работе с текстовыми файлами, что обеспечило надежность и стабильность приложения. Тем не менее отмечено несколько перспективных направлений для совершенствования системы.

1. Интеграция с другими системами. Реализация интерфейсов обмена данными с бухгалтерскими и логистическими модулями позволит автоматизировать еще больше процессов и снизит вероятность возникновения ошибок, обусловленных повторным ручным вводом информации.

2. Использование полноценной базы данных. Переход на реляционные системы управления базами данных, например MySQL или PostgreSQL, может значительно повысить производительность приложения и упростить его масштабирование, особенно при работе с большими объемами сведений.

3. Улучшение пользовательского интерфейса. Расширение возможностей для фильтрации данных, импорта и экспорта информации, а также более наглядная визуализация отчетов (графики, диаграммы) сделают работу пользователей еще более удобной и эффективной.

4. Автоматизация отчетности. Добавление функционала по автоматической генерации и рассылке отчетов, в том числе оперативной статистики и прогнозов, существенно упростит управленческий контроль и повысит оперативность принятия решений.

Таким образом, созданная система способна обеспечить комплексное и эффективное решение для учета поставок и продаж вин в условиях малого и среднего бизнеса. Ее дальнейшее развитие, заключающееся во внедрении более производительных систем хранения данных и расширении функционала, даст возможность еще более результативно управлять товарными запасами и оптимизировать процессы внутри предприятия.

### Список источников

1. Мацяшек Л. А., Лионг Б. Л. Практическая программная инженерия на основе учебного примера / пер. с англ. А. М. Епанешникова, 4-е изд. М. : Лаборатория знаний, 2020. 959 с.
2. Гафарова Е. А. Креативность как информационная система и педагогический феномен : моногр. М. : Проспект, 2023. 112 с.
3. Рик Г. Объектно-Ориентированное Программирование. М. : СОЛОН-Пресс, 2018. 298 с.
4. Horstmann C. S. Core Java, Volume I: Fundamentals. 12th ed. Oracle Press, 2021. 944 p.
5. Горяинов А. В., Гуськов Г. Ю. Разработка информационной системы «Платформа подбора участников медийных мероприятий» // Прикладные информационные системы (ПИС-2022) : сб. науч. тр. VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 30 мая – 05 июня 2022 г. Ульяновск. Ульяновск : УлГТУ, 2022. С. 14–20.
6. Комлев Н. Ю. Объектно-Ориентированное Программирование. Хорошая книга для хороших людей. М. : СОЛОН-Пресс, 2014. 298 с.
7. Бауэр К., Кинг Г., Грегори Г. Java Persistence API и Hibernate / пер. с англ. Д. А. Зинкевич. М. : ДМК Пресс, 2017. 632 с.
8. The Java™ Tutorials. URL: <https://docs.oracle.com/javase/tutorial/uiswing/> (дата обращения: 14.02.2025).

### Информация об авторах

**С. С. Романов** – студент;  
<https://orcid.org/0009-0006-3321-6176>,  
[romanovkrutoy456672312@mail.ru](mailto:romanovkrutoy456672312@mail.ru)✉

**Д. Ю. Зорькин** – преподаватель;  
<https://orcid.org/0009-0002-3875-9285>,  
[mosh285@gmail.com](mailto:mosh285@gmail.com)

**Н. В. Клячина** – старший преподаватель;  
<https://orcid.org/0009-0003-2472-2358>,  
[klntv@mail.ru](mailto:klntv@mail.ru)

### References

1. Maciaszek L. A., Liong B. L. Practical software engineering: A case-study approach. Epaneshnikov A. M., trans. 4th ed. Moscow: Laboratoriya znaniy; 2020. 959 p. (In Russ.).
2. Gafarova E. A. Kreativnost kak informatsionnaya sistema i pedagogicheskiy fenomen. Monograph. Moscow: Prospekt; 2023. 112 p. (In Russ.).
3. Rick G. Obyektno-Orientirovannoe Programirovanie. Moscow: SOLON-Press; 2018. 298 p. (In Russ.).
4. Horstmann C. S. Core Java, Volume I: Fundamentals. 12th ed. Oracle Press; 2021. 944 p.
5. Goryaynov A. V., Guskov G. Yu. Razrabotka informatsionnoy sistemy “Platforma podbora uchastnikov mediynykh meropriyatiy”. In: *Proceedings of the 8th All-Russian Research-to-Practice International Conference: “Prikladnye informatsionnye sistemy (PIS-2022)”*, May 30–June 5, 2022, Ulyanovsk. Ulyanovsk: USTU; 2022. p. 14–20. (In Russ.).
6. Komlev N. Yu. Obyektno-Orientirovannoe Programirovanie. Khoroshaya kniga dlya khoroshikh lyudey. Moscow: SOLON-Press; 2014. 298 p. (In Russ.).
7. Bauer K., King G., Gregory G. Java persistence with Hibernate. Zinkevich D. A., trans. Moscow: DMK Press; 2017. 632 p. (In Russ.).
8. The Java™ Tutorials. URL: <https://docs.oracle.com/javase/tutorial/uiswing/> (accessed: 14.02.2025).

### About the authors

**S. S. Romanov** – Student;  
<https://orcid.org/0009-0006-3321-6176>,  
[romanovkrutoy456672312@mail.ru](mailto:romanovkrutoy456672312@mail.ru)✉

**D. Yu. Zorkin** – Lecturer;  
<https://orcid.org/0009-0002-3875-9285>,  
[mosh285@gmail.com](mailto:mosh285@gmail.com)

**N. V. Klyachina** – Senior Lecturer;  
<https://orcid.org/0009-0003-2472-2358>,  
[klntv@mail.ru](mailto:klntv@mail.ru)

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

Научная статья

УДК 536.24

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-10>



**Исследование интенсивности теплообмена прямого и обращенного пламени на продольном стабилизаторе**

**Максим Михайлович Алексеев, Олег Юрьевич Семенов**✉  
Сургутский государственный университет, г. Сургут, Россия

**Аннотация.** В статье представлено исследование механизмов обращения и опрокидывания пламени, а также их влияние на процессы теплообмена в камере сгорания. В качестве объекта анализа рассмотрена конфигурация стабилизированного пламени предварительно перемешанной газозооной смеси. Показано, что явление опрокидывания пламени способствует формированию вихревых структур, которые существенно усиливают теплообменные процессы. Анализ температурных зависимостей демонстрирует значительное увеличение интенсивности теплообмена при инверсии пламени, это открывает перспективы для оптимизации энергетических систем с целью повышения их эффективности.

**Ключевые слова:** стабилизация пламени, газовая смесь, вихревые структуры, неустойчивость, теплоперенос, калориметр, гидродинамика

**Для цитирования:** Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Исследование интенсивности теплообмена прямого и обращенного пламени на продольном стабилизаторе // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 3. С. 91–97. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-10>.

Original article

**Study on heat exchange rate of direct and inverted flame on longitudinal flame holder**

**Maksim M. Alekseev, Oleg Yu. Semenov**✉  
Surgut State University, Surgut, Russia

**Abstract.** The paper studies the mechanisms that control flame direction and tumbling, as well as their influence on heat exchange processes in the combustion chamber. The configuration of a stabilized flame of a pre-mixed gas-air mixture is the object of analysis. Flame tumbling, as revealed by the authors, creates vortex structures, which boosts heat exchange. Analysis of temperature dependence demonstrates a significant increase in heat exchange rate during flame inversion, giving prospects for optimizing energy systems in order to increase their efficiency.

**Keywords:** flame stabilization, gas mixture, vortex structures, instability, heat-mass transfer, calorimeter, hydrodynamics

**For citation:** Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Study on heat exchange rate of direct and inverted flame on longitudinal flame holder. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(3): 91–97. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-10>.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время процесс сжигания различных видов топлива, включая природный газ, является основным источником энергии. Особое внимание уделяется исследова-

нию характеристик прямого, обращенного и опрокинутого пламени на газовых горелках, так как эти режимы горения оказывают влияние на эффективность работы оборудования и уровень выбросов загрязняющих веществ;

необходимы дополнительные исследования структуры пламени и параметров, определяющих его устойчивость.

В статье [1] показано, что стабилизация пламени происходит только в определенном диапазоне скоростей потока. В работе [2] авторы изучали устойчивость и структуру пламени конической формы при сжигании метановоздушной смеси. В исследовании [3] описаны эксперименты, которые позволили оценить теплотери в обращенном пламени, стабилизированном на срезе тонкого стержня. Авторами работы [4] выявлено, что гидродинамические характеристики обращенного пламени, полученного на продольном стабилизаторе, приводят к возникновению вихрей около фронта пламени и влияют на процессы тепло- и массообмена в камере сгорания. Изучение механизма стабилизации пламени газовой горелки на перфорированной пластине представлено в работе [5]. Результаты исследования особенностей горения газов и теплопереноса в цилиндрической камере сгорания описаны авторами в исследовании [6]. В статье [7] изложена методика определения динамических характеристик температурных и структурных параметров пламени.

В работах [8–11] определялись такие физические параметры: скорость фронта пламени, концентрация газов, входящих в состав горю-

чей смеси, и распределение температур. Газовоздушное пламя благодаря своей высокой устойчивости в широком диапазоне режимов горения находит применение в различных областях, таких как энергетические установки, газовые горелки и экологические системы сжигания [12–15].

Целью данного исследования является выполнение экспериментальных исследований и количественный анализ характеристик теплообмена в условиях обращения и инверсии пламени в потоке пропано-воздушной смеси на продольном стабилизаторе.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения экспериментов исследования пламени и последующего анализа влияния режимов течения была разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. Цилиндрический калориметр с камерой сгорания являлся основным элементом установки; внутри камеры происходила стабилизация фронта пламени (2), которая способствовала равномерному горению и точному определению тепловых параметров. Различные по форме пламена моделировали с помощью стабилизатора в виде тонкого стержня диаметром 2 мм (3), расположенного вдоль оси сопла (4) с круглым сечением и диаметром 4,8 мм. Часть металли-

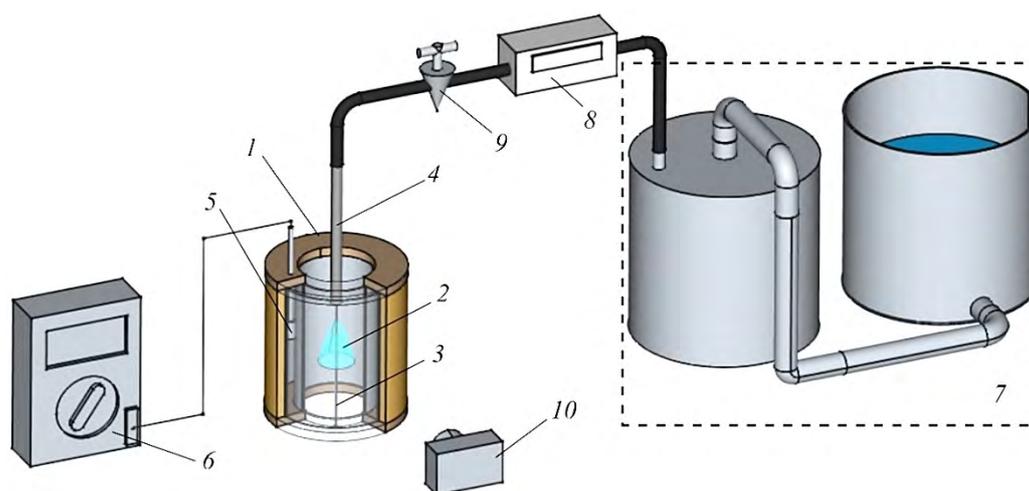


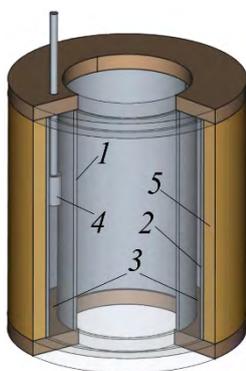
Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки: 1 – камера калориметра; 2 – фронт пламени; 3 – стабилизирующий элемент; 4 – сопловой канал; 5 – термопара для измерения температуры; 6 – мультиметр регистрации сигналов; 7 – газометр вытеснения для подготовки газовой смеси; 8 – расходомер учета газа; 9 – регулирующий газовый кран; 10 – устройство визуализации (цифровой фотоаппарат)

Примечание: составлено авторами.

ческого стержня находилась внутри полости сопла для обеспечения необходимого режима стабилизации пламени.

Температурные параметры жидкости измерялись с помощью термопары (5), установленной в центральной области калориметра, а также регистрировались с помощью мультиметра (6). Экспериментальные серии проводились на стехиометрической смеси пропана и воздуха, подготовленной в газометре вытеснения (7). Расходомер газа (8) позволял контролировать скорость подачи пропановоздушной смеси на уровне 2,4 л/мин с помощью газового крана (9) экспериментальной установки. Такой расход обеспечивал устойчивое горение как прямого, так и обращенного пламени на стабилизаторе.

Камера сгорания калориметра, изображенная на рис. 2, состояла из двух полых металлических цилиндров, расположенных в пространстве на одной оси (1, 2). Пространство между внутренней поверхностью внешнего цилиндра и наружной поверхностью внутреннего цилиндра (3) заполнялось изопропиловым спиртом, который использовался в качестве нагреваемой жидкости для измерения тепловых потоков, а его температуру измеряли термопарой (4). Общая высота калориметра составляла 175 мм, внутренний диаметр конструкции – 65 мм, а толщина стенки – 0,1 мм. Для минимизации тепловых потерь калориметр был дополнительно теплоизолирован с внешней стороны (5).



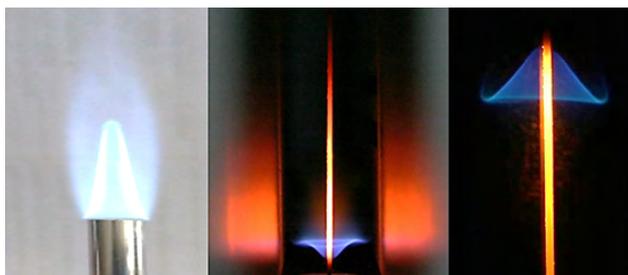
**Рис. 2.** Устройство калориметра: 1 – внутренняя стенка; 2 – внешняя стенка; 3 – изопропиловый спирт, 4 – термопара, 5 – теплоизоляция  
Примечание: составлено авторами.

Исследование влияния положения стабилизированного фронта пламени относительно направления силы тяжести на интенсивность теплообмена проводилось путем поворота камеры сгорания, сочетаемой с соплом и стабилизатором, на  $180^\circ$  вокруг горизонтальной оси. Такой поворот обеспечивал возможность наблюдения за опрокинутыми формами прямого и обращенного пламени.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе под обращенным пламенем понимается конфигурация фронта горения предварительно перемешанной газозооной смеси, устойчивого на осевом или поперечном стабилизаторе, в условиях дозвукового потока, при которой фронт формирует инвертированный конус (для осевого стержня) (рис. 3 посередине) или V-образную структуру (для поперечного стабилизатора). Такая конфигурация пламени обеспечивается замедлением потока в пограничном слое у поверхности стабилизатора, локальным балансом скорости горения и скорости потока, а для поперечных тел – зонами рециркуляции и вихревыми структурами, отклоняющими фронт вверх по течению. Это явление принципиально отличается от классического прямого конуса пламени, стабилизированного на срезе горелки, где фронт ориентирован по направлению потока (рис. 3 слева). Обращенные пламена актуальны для систем с экстремальными параметрами (высокоскоростные потоки, бедные смеси), где требуется повышенная устойчивость горения.

На рис. 3 справа показана фотография «опрокинутого» обращенного пламени. При



**Рис. 3.** Изображения различных видов пламени: прямое, обращенное и опрокинутое обращенное  
Примечание: фото авторов.

«опрокидывании» фронт, сохраняя положение и форму конуса против направления потока, стабилизируется в условиях, когда поток смеси направлен по ускорению свободного падения (например, подача смеси сверху вниз). Этот случай отличается от классических случаев, где смесь обычно подается против силы тяжести, что создает дополнительные физические эффекты: горячие продукты сгорания, обладающие меньшей плотностью, под действием архимедовой силы стремятся двигаться вверх, навстречу потоку газовой смеси, усиливая тенденцию к срыву пламени. При опрокидывании фронта пламени в экспериментах наблюдалось самопроизвольное возникновение вихревых структур в камере сгорания в области фронта пламени (рис. 4).

Для визуализации турбулентных потоков в пламени применялся метод светящихся частиц: в газоздушную смесь вводились частицы окиси магния, поступавшие из контейнера, закрепленного на газовой трубке установки. Эти частицы освещались плоским лазерным лучом, что позволяло осуществлять наблюдение за формированием вихрей, их геометрией и расположением. Формирующиеся турбулентные структуры приводили к усилению теплообмена между областью горения и стенками камеры сгорания, оказывая значительное влияние на процессы теплообмена и протекание химических реакций во фронте пламени.

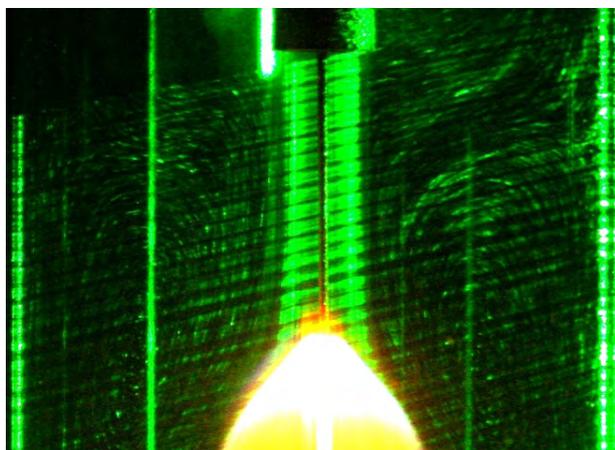


Рис. 4. Турбулентные образования в обращенном пламени на продольном стабилизаторе  
 Примечание: фото авторов.

Одним из критериев подобия, используемых для количественной оценки теплообмена между газовым потоком и твердой поверхностью, является безразмерное число Нуссельта ( $Nu$ ), которое определяется по следующей формуле:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $L$  – характерный размер исследуемой области, а  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды.

Для сравнения интенсивности процессов теплообмена в двух случаях можно воспользоваться отношением  $Nu_1/Nu_2$ . Скорость роста температуры поверхности  $dT_s/dt$  определяется тепловым потоком  $q$  и теплоемкостью материала:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{q}{\rho c_p \delta}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность материала поверхности,  $c_p$  – удельная теплоемкость,  $\delta$  – характерная толщина прогрева. Тепловой поток  $q$  выражается через  $\alpha$  и разность температур:

$$q = \alpha \cdot (T_g - T_s), \quad (3)$$

$T_g$  – температура газа,  $T_s$  – температура поверхности.

Подставляя  $q$  из уравнения (3) в уравнение (2) и выражая коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  через число Нуссельта  $Nu$  (1), получаем:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{Nu \cdot \lambda \cdot (T_g - T_s)}{L \cdot \rho c_p \delta}. \quad (4)$$

Для двух разных условий отношение  $Nu_1/Nu_2$  пропорционально отношению скоростей роста температуры:

$$\frac{(dT_s/dt)_1}{(dT_s/dt)_2} = \frac{Nu_1}{Nu_2} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \frac{(T_g - T_s)_1}{(T_g - T_s)_2} \cdot \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{(t \rho c_p \delta)_2}{(t \rho c_p \delta)_1} \quad (5)$$

Если геометрия и свойства материалов поверхностей и газов одинаковы, а разности температур сопоставимы, то согласно (4) и (5):

$$\frac{Nu_1}{Nu_2} \approx \frac{(dT_s/dt)_1}{(dT_s/dt)_2}. \quad (6)$$

Таким образом, для сравнения интенсивностей процессов теплообмена можно использовать отношение скоростей нагрева поверхностей теплообмена (6). Анализ временных зависимостей изменения температуры в калориметре, представленных на рис. 5, позволил оценить скорости нагрева жидкости в калориметре для различных типов пламени.

После анализа экспериментальных данных установлено, что интенсивность теплообмена возрастает в диапазоне 2,81–3,94 раза при стабилизации фронта горения на продольном стержне в условиях, отличающихся от прямого пламени. При инверсии пламени наблюдается рост скорости нагрева жидкости в калориметре в 4,92–5,23 раза. Обнаружено, что при опрокидывании пламени зафиксировано увеличение скорости нагрева в 6,43–8,42 раза по сравнению с режимом прямого конусообразного пламени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали, что опрокидывание фронта пламени приводит к возникновению вихревых структур, которые значительно усиливают теплообмен и интенсифицируют процессы сгорания, что подтверждается увеличением скорости нагрева жидкости в кало-

### Список источников

1. Brailovsky I., Sivashinsky G. On stabilization and blowoff of inverted spherical flames // *Combustion Science and Technology*. 1997. Vol. 122, no. 1–6. P. 95–111. <https://doi.org/10.1080/00102209708935606>.
2. Dakka S. M. Numerical analysis of flame characteristics and stability for conical nozzle burner // *Journal of Thermal Engineering*. 2019. Vol. 5, no. 5. P. 422–445. <https://doi.org/10.18186/thermal.624070>.
3. Шошин Ю. Л., Гозй Л. П. Х. О корреляции между пределами стабилизации обращенного пламени и градиентом скорости вблизи поверхности стабилизатора // *Физика горения и взрыва*. 2015. Т. 51, № 5. С. 13–21. <https://doi.org/10.15372/FGV20150502>.
4. Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Визуализация структуры обращенного пламени // *Россия молодая : сб. материалов XVI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, 16–19 апреля 2024 г., г. Кемерово. Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2024. С. 021218.1–021218.4.*

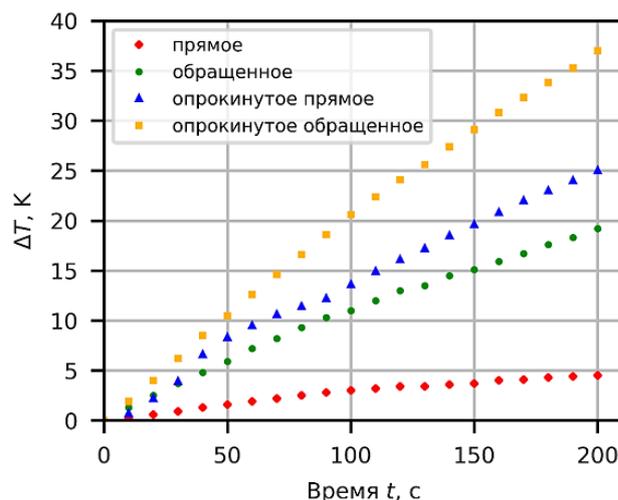


Рис. 5. Зависимости температуры жидкости в калориметре от времени при различных режимах стабилизации пламени

Примечание: составлено авторами.

риметре. Эти результаты подчеркивают важность изучения нестандартных конфигураций пламени для оптимизации процессов сгорания и повышения эффективности теплопередачи в энергетических системах. Полученные результаты могут применяться в технологиях, ориентированных на снижение экологических выбросов и повышение эффективности работы газовых устройств.

### References

1. Brailovsky I., Sivashinsky G. On stabilization and blowoff of inverted spherical flames. *Combustion Science and Technology*. 1997;122(1–6):95–111. <https://doi.org/10.1080/00102209708935606>.
2. Dakka S. M. Numerical analysis of flame characteristics and stability for conical nozzle burner. *Journal of Thermal Engineering*. 2019;5(5):422–445. <https://doi.org/10.18186/thermal.624070>.
3. Shoshin Yu. L., Goei L. P. H. On the correlation of inverted flame blow-off limits with the boundary velocity gradient at the flame holder surface. *Fizika gorennya i vzryva*. 2015;51(5):13–21. <https://doi.org/10.15372/FGV20150502>. (In Russ.).
4. Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Visualizatsiya struktury obrashchennogo plameni. In: *Proceedings of the 16th All-Russian Research-to-Practice Conference of young scientists with international participation "Rossiya molodaya"*, April 16–19, 2024, Kemerovo. Kemerovo: T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; 2024. p. 21218.1–21218.4. (In Russ.).
5. Kedia K. S., Ghoniem A. F. Mechanisms of stabilization and blowoff of a premixed flame downstream of a heat-

5. Kedia K. S., Ghoniem A. F. Mechanisms of stabilization and blowoff of a premixed flame downstream of a heat-conducting perforated plate // *Combustion and Flame*. 2012. Vol. 159, no. 3. P. 1055–1069. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.10.014>.
6. Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Физическое моделирование тьюльпанообразного пламени при горении газов в цилиндрической вертикальной трубе // *Вестник кибернетики*. 2021. № 1. С. 63–70. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2021-1-63-70>.
7. Ефимова А. В., Жилкин Б. П., Шевелев М. М. и др. Тепловизионная идентификация структуры турбулентной воздушной струи при ее взаимодействии с приемником потока // *Альтернативная энергетика и экология*. 2012. № 4. С. 87–90.
8. Дулин В. М., Маркович Д. М., Токарев М. П. и др. Применение современных оптических методов для диагностики и пространственной структуры турбулентных пламен // *Автометрия*. 2012. № 3. С. 22–32.
9. Li J., Acharya S. Flame stabilization through forcing: Velocity measurements // *Combustion Science and Technology*. 2000. Vol. 152, no. 1. P. 1–21. <https://doi.org/10.1080/00102200008952124>.
10. Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Изучение распространения пламени в расширяющейся сфере // *Вестник кибернетики*. 2022. № 3. С. 75–83. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-3-75-83>.
11. Vance F. H., Shoshin Y., Goey L. P. H. et al. Flame stabilization regimes for premixed flames anchored behind cylindrical flame holders // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021. Vol. 38, no. 2. P. 1983–1992. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.07.008>.
12. Su H., Wu Y., Yan J. et al. Experimental study on chemiluminescence properties of ammonia-methane non-premixed laminar flames // *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 2. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/en18020402>.
13. Kazemimanesh M., Moallemi A., Thomson K. et al. A novel miniature inverted-flame burner for the generation of soot nanoparticles // *Aerosol Science and Technology*. 2019. Vol. 53, no. 2. P. 184–195. <https://doi.org/10.1080/02786826.2018.1556774>.
14. Балабанов Р. А. Изучение влияния трехмерности на стабилизацию фронта пламени в дозвуковом течении с перемешанным горением // *Горение и взрыв*. 2024. Т. 17, № 4. С. 15–28. <https://doi.org/10.30826/CE24170402>.
15. Rabee B. A. The effect of inverse diffusion flame burner-diameter on flame characteristics and emissions // *Energy*. 2018. Vol. 160. P. 1201–1207. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.061>.
- conducting perforated plate. *Combustion and Flame*. 2012;159(3):1055–1069. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.10.014>.
6. Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Tulip flame physical modeling during gaseous combustion in a cylindrical vertical pipe. *Proceedings in Cybernetics*. 2021;(1):63–70. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2021-1-63-70>. (In Russ.).
7. Efimova A. V., Zhilkin B. P., Shevelev M. M. et al. Thermal imaging characterization of turbulent air flow structure during its interaction with airflow receiver. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2012;(4):87–90. (In Russ.).
8. Dulin V. M., Markovich D. M., Tokarev M. P. et al. Primenenie sovremennykh opticheskikh metodov dlya diagnostiki prostranstvennoy struktury turbulentnykh plamyon. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2012;(3):22–32. (In Russ.).
9. Li J., Acharya S. Flame stabilization through forcing: Velocity measurements. *Combustion Science and Technology*. 2000;152(1):1–21. <https://doi.org/10.1080/00102200008952124>.
10. Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Study of flame propagation in an expanding sphere. *Proceedings in Cybernetics*. 2022;(3):75–83. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-3-75-83>. (In Russ.).
11. Vance F. H., Shoshin Y., Goey L. P. H. et al. Flame stabilization regimes for premixed flames anchored behind cylindrical flame holders. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021;38(2):1983–1992. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.07.008>.
12. Su H., Wu Y., Yan J. et al. Experimental study on chemiluminescence properties of ammonia-methane non-premixed laminar flames. *Energies*. 2025;18(2):1–13. <https://doi.org/10.3390/en18020402>.
13. Kazemimanesh M., Moallemi A., Thomson K. et al. A novel miniature inverted-flame burner for the generation of soot nanoparticles. *Aerosol Science and Technology*. 2019;53(2):184–195. <https://doi.org/10.1080/02786826.2018.1556774>.
14. Balabanov R. A. Investigation of three-dimension at effects on flame stabilization in a subsonic flow with premixed combustion. *Combustion and explosion*. 2024;17(4):15–28. <https://doi.org/10.30826/CE24170402>. (In Russ.).
15. Rabee B. A. The effect of inverse diffusion flame burner-diameter on flame characteristics and emissions. *Energy*. 2018;160:1201–1207. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.061>.

**Информация об авторах**

**М. М. Алексеев** – кандидат физико-математических наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>,  
amm.iff@gmail.com

**О. Ю. Семенов** – кандидат физико-математических наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>,  
ous.tutor.phinma@mail.ru<sup>✉</sup>

**About the authors**

**M. M. Alekseev** – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;

<https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>,  
amm.iff@gmail.com

**O. Yu. Semenov** – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;

<https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>,  
ous.tutor.phinma@mail.ru<sup>✉</sup>

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания <https://www.vestcyber.ru> и в базе данных Научной электронной библиотеки на сайте [elibrary.ru](http://elibrary.ru), сведения о публикуемых материалах включаются в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес учредителя и издателя:  
бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры  
«Сургутский государственный университет»,  
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, пр. Ленина, 1. Тел. +7 (3462) 76-29-29

Дата опубликования 14.10.2025.