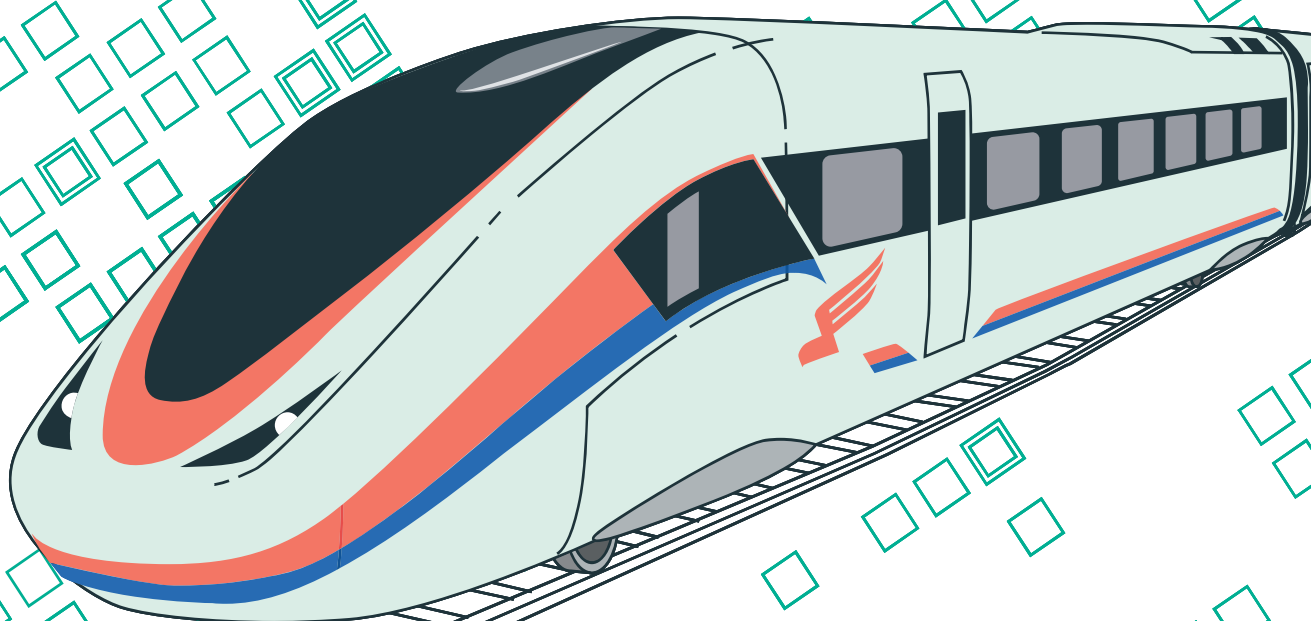


Интеллектуальные технологии на транспорте

Intellectual Technologies
on Transport



Выпуск 3
2026

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ
(сетевой электронный научный журнал)
Выпуск 3 (47), 2026

ISSN 2413-2527

Сетевой электронный научный журнал, свободно распространяемый через интернет. Публикуются статьи на русском и английском языках с результатами исследований и практических достижений в области интеллектуальных технологий и сопутствующих им научных исследований. Журнал основан в 2015 году.

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС).

Издатель

ООО «Медиа-Сервис» по договору № ЭА87426 от 12.01.2026.

Периодичность выхода — 4 номера в год.

Адрес редакции:

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
e-mail: itt-pgups@yandex.ru
Телефон: +7 (812) 457-86-06

Сетевое издание «Интеллектуальные технологии на транспорте (сетевой электронный научный журнал), Intellectual Technologies on Transport» зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство Эл № ФС77-61707 от 07.05.2015.

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Информация предназначена для читателей старше 16 лет.

Выпуски журнала доступны на сайте <http://itt-pgups.ru>

Хомоненко А.Д., д. т. н., проф., С.-Петербург, РФ — главный редактор

Божко Л.М., д. э. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ — заместитель главного редактора

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Сопредседатели редакционного совета:

Валинский О.С., к. т. н., ректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Чаркин Е.И., зам. гендиректора по ИТ ОАО «РЖД», Москва, РФ

Ададуров С.Е., д. т. н., проф., ВНИИЖТ, Москва, РФ
Дудин А.Н., д. ф.-м. н., проф., БГУ, Минск, Беларусь
Корниенко А.А., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Макаренко С.И., д. т. н., доц., ПАО «Интелтех», С.-Петербург, РФ
Титова Т.С., д. т. н., проф., первый проректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Александрова Е.Б., д. т. н., проф., СПбПУ, С.-Петербург, РФ
Басыров А.Г., д. т. н., проф., ВКА, С.-Петербург, РФ
Безродный Б.Ф., д. т. н., проф., ООО «1520 Сигнал», Москва, РФ
Благовещенская Е.А., д. ф.-м. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Бубнов В.П., д. т. н., проф., С.-Петербург, РФ

Булавский П.Е., д. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Василенко М.Н., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Глухов А.П., д. т. н., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Гуда А.Н., д. т. н., проф., РГУПС, Ростов-на-Дону, РФ
Ермаков С.Г., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Заборовский В.С., д. т. н., проф., СПбПУ, С.-Петербург, РФ
Канаев А.К., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Котенко А.Г., д. т. н., проф., ВНИИЖТ, Москва, РФ
Куренков П.В., д. э. н., к. т. н., проф., РУТ (МИИТ), Москва, РФ
Лецкий Э.К., д. т. н., проф., РУТ (МИИТ), Москва, РФ
Наседкин О.А., к. т. н., доц., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Никитин А.Б., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Новиков Е.А., д. т. н., доц., ВКА, С.-Петербург, РФ
Охтилев М.Ю., д. т. н., проф., НИО ЦИТ «Петрокомета», С.-Петербург, РФ
Привалов А.А., д. воен. н., проф., Академия войск национальной гвардии, С.-Петербург, РФ
Соколов Б.В., д. т. н., проф., СПб ФИЦ РАН, С.-Петербург, РФ
Таранцев А.А., д. т. н., проф., ИПТ РАН, С.-Петербург, РФ
Утепбергенов И.Т., д. т. н., проф., АУЭС, Алматы, Казахстан
Фазылов Ш.Х., д. т. н., проф., НИИ развития цифровых технологий и ИИ, Ташкент, Узбекистан
Хабаров В.И., д. т. н., проф., СГУПС, Новосибирск, РФ
Ходаковский В.А., д. т. н., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Чехонин К.А., д. ф.-м. н., доц., ХВИЦ ДВО РАН, Хабаровск, РФ

INTELLECTUAL TECHNOLOGIES ON TRANSPORT

(Network electronic scientific journal)

Issue 3 (47), 2026

ISSN 2413-2527

Network electronic scientific journal, open access.
It publishes articles in Russian and English with the results of research and practical achievements in the field of intelligent technologies and associated research.
Founded in 2015.

Founder

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University"

Publisher

Media Service LLC, no. 9A87426,
12.01.2026.

Frequency of release — 4 issues per year.

Editorial address:

190031, St. Petersburg, Moskovsky ave., 9
e-mail: itt-pgups@yandex.ru
Phone: +7 812 457 86 06

The online journal "Intellectual Technologies on Transport" is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies, and Mass Media.
El no. FS77-61707 Testimony from 07.05.2015.

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI).

The content is for readers over the age of 16.
Issues of the magazine are available at <http://itt-pgups.ru>

Khomonenko A.D., Dr. Sci. in Engineering, Prof.,
St. Petersburg, Russia — Editor-in-Chief
Bozhko L.M., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia —
Deputy Editor-in-Chief

EDITORIAL COUNCIL MEMBERS

Co-chairs of the Editorial Council:

Valinsky O.S., PhD in Engineering, rector
of PSTU, St. Petersburg, Russia
Charkin E.I., CIO of JSC "Russian Railways", Moscow,
Russia

Adadurov S.E., Prof., VNIIZHT, Moscow, Russia
Dudin A.N., Prof., BSU, Minsk, Belarus
Kornienko A.A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia
Makarenko S.I., As. Prof., Inteltech, St. Petersburg, Russia
Titova T.S., Prof., First Vice-Rector PSTU, St. Petersburg,
Russia

EDITORIAL BOARD MEMBERS

Aleksandrova E.B., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
Basyrov A.G., Prof., MSA, St. Petersburg, Russia
Bezrodny B.F., Prof., 1520 Signal LLC, Moscow, Russia
Blagoveshchenskaya E.A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia
Bubnov V.P., Prof., St. Petersburg, Russia

Bulavsky P.E., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia
Vasilenko M.N., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia
Glukhov A.P., PSTU, St. Petersburg, Russia
Guda A.N., Prof., RSTU, Rostov-on-Don, Russia
Ermakov S.G., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia
Zaborovsky V.S., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
Kanaev A.K., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia
Kotenko A.G., Prof., VNIIZHT, Moscow, Russia
Kurenkov P.V., Prof., RUT (MIIT), Moscow, Russia
Letsky E.K., Prof., RUT (MIIT), Moscow, Russia
Nasedkin O.A., As. Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia
Nikitin A.B., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia
Novikov E.A., As. Prof., MSA, St. Petersburg, Russia
Okhtilev M. Yu., Prof., JSC "Petrokometa", St. Petersburg,
Russia
Privalov A.A., Prof., Academy of the National Guard
Troops, St. Petersburg, Russia
Sokolov B.V., Prof., SPC RAS, St. Petersburg, Russia
Tarantsev A.A., Prof., IPT RAS, St. Petersburg, Russia
Utepbergenov I.T., Prof., AUPET, Almaty, Kazakhstan
Fazilov Sh. X., Prof., AIRI, Tashkent, Uzbekistan
Khabarov V.I., Prof., STU, Novosibirsk, Russia
Khodakovskiy V.A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia
Chekhnin K.A., Prof., Khabarovsk FRC RAS,
Khabarovsk, Russia

Содержание

Информационная безопасность и защита данных

Басыров А. Г., Неаскин С. Р.

Имитационная модель обеспечения безопасности автоматизированной информационной системы на основе реконфигурирования параметров системы защиты 5

Искусственный интеллект и транспортные системы

Барановский А. М., Бобриков Д. А., Молодкин И. А.

Формирование разделяющих поверхностей классов технических состояний в задачах обучения интеллектуальных агентов диагностики. 18

Бараусов В. А., Бубнов В. П., Забузов В. С., Моисеев В. И.

Алгоритмы функционирования датчика осадков, интерфейс взаимодействия с системой обогрева и программная реализация. 35

Математическое и программное обеспечение вычислительных комплексов и сетей

Волошин Р. А., Хомоненко А. Д., Юдников С. С.

Сравнительный анализ реализации модели «ключ — значение» в PostgreSQL и Redis: оценка задержек и пропускной способности. 44

Гильванов Р. Г., Горн Д. И., Королева А. Ю., Несенов Е. С.

Свойства полупроводника на основе атомов кремния: интерактивная трехмерная модель на языке C# 56

Забродин А. В., Хонина О. И., Фадхутдинов К. Э.

Реконструкция межсервисных отношений по трассировочным данным 63

Математическое моделирование и системный анализ

Герасименко П. В.

Математическое моделирование и прогнозирование динамики демографии в Российской Федерации в XXI веке. 72

Утепбергенов И. Т., Сейтбекова А. М.

Анализ программных средств моделирования систем централизованного теплоснабжения. 82

Ходаковский В. А.

Передача информации в канале ТЧ без применения нелинейной операции модуляции. 93

Contents

Information Security and Data Protection

Basyrov A. G., Neaskin S. R.

An Imitation Model for Ensuring the Security of an Automated Information System Based
on Reconfiguring the Protection System Parameters5

Artificial Intelligence and Transport Systems

Baranovsky A. M., Bobrikov D. A., Molodkin I. A.

Formation of Separating Surfaces for Classes of Technical States in the Tasks of Training
Intelligent Diagnostic Agents18

Barausov V. A., Bubnov V. P., Zabuzov V. S., Moiseev V. I.

Algorithms for Precipitation Sensor Operation, Interface for Interaction with the Heating System,
and Software Implementation.35

Mathematical and Software Support for Computer Complexes and Networks

Voloshin R. A., Khomonenko A. D., Yudnikov S. S.

Investigation of Key-Value Model Performance in PostgreSQL and Redis: A Comparative Analysis
of Read/Write Operations and Parallel Load Impact44

Gilvanov R. G., Gorn D. I., Koroleva A. Yu., Nesenov E. S.

Properties of a Semiconductor Based on Silicon Atoms: An Interactive Three-Dimensional Model in C#56

Zabrodin A. V., Khonina O. I., Fadkhutdinov K. E.

Reconstruction of Interservice Relationships from Tracing Data.63

Mathematical Modelling and System Analysis

Gerasimenko P. V.

Mathematical Modeling and Forecasting of Demographic Dynamics in the Russian Federation
in the XXI Century72

Utepbergenov I. T., Seitbekova A. M.

Analysis of Software Tools for Modeling District Heating Systems82

Khodakovsky V. A.

Information Transmission in a Voice-Frequency Channel without Using a Nonlinear
Modulation Operation.93

УДК 004.056

Имитационная модель обеспечения безопасности автоматизированной информационной системы на основе реконфигурирования параметров системы защиты

Басыров Александр Геннадьевич — доктор техн. наук, профессор. Профессор кафедры информационно-вычислительных систем и сетей. Научные интересы: моделирование информационных систем. E-mail: alexanderbas@mail.ru

Неаскин Станислав Романович — адъюнкт Военного института (научно-исследовательского). Научные интересы: информационная безопасность. E-mail: stasneas@bk.ru

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Для цитирования: Басыров А. Г., Неаскин С. Р. Имитационная модель обеспечения безопасности автоматизированной информационной системы на основе реконфигурирования параметров системы защиты // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 3 (47). С. 5–17. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-5-17

Аннотация. *Представлено исследование, посвященное разработке имитационной модели автоматизированной информационной системы в условиях штатной нагрузки и деструктивных воздействий. Цель: повышение устойчивости системы к возмущающим воздействиям за счет своевременного обнаружения нештатного состояния и последующего реконфигурирования параметров защиты. Методы: имитационное моделирование, последовательный анализ Вальда, анализ Парето, взвешенная свертка критериев потенциального ущерба и ресурсных затрат. Результаты: модель позволяет формировать штатный профиль событий, выявлять отклонения в потоках системных журналов, классифицировать характер воздействия и выбирать рациональную конфигурацию защиты. Практическая значимость: сокращение времени восстановления работоспособности системы и снижение потенциального ущерба при деструктивных воздействиях. Дальнейшее развитие модели связано с расширением состава источников событий и уточнением параметров оценки потенциального ущерба. Исследование может быть использовано при анализе устойчивости и защищенности автоматизированных систем.*

Ключевые слова: автоматизированная информационная система, последовательный анализ Вальда, множество Парето, реконфигурирование, журналы событий системы

2.3.6 — методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки);
1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

Введение

Современные автоматизированные информационные системы (АИС) функционируют в условиях постоянного изменения сетевой нагрузки,

программных отказов, эксплуатационных сбоев и целенаправленных действий нарушителя. Одним из подходов к диагностике состояния таких систем

является постоянный анализ системных журналов в режиме реального времени [1]. При этом практическая задача защиты не сводится только к обнаружению факта воздействия на систему. После обнаружения необходимо определить, какие параметры защиты следует активировать, чтобы снизить потенциальный ущерб, связанный с деструктивными воздействиями, не перегрузив систему избыточными вычислительными и сетевыми затратами [2–6].

На практике эта задача осложняется несколькими обстоятельствами. Во-первых, события безопасности поступают из разных источников: операционной системы, активного сетевого оборудования (АСО), прикладного программного обеспечения и др. [7]. Во-вторых, часть событий является штатной и не должна приводить к ложной тревоге. В-третьих, реакция системы должна учитывать компромисс между уровнем защиты и затратами включаемых механизмов парирования.

Предлагаемая модель функционирования автоматизированной информационной системы позволяет воспроизводить поток событий, обнаруживать нештатное состояние статистическим методом и выбирать рациональную конфигурацию защиты с учетом остаточного ущерба и вычислительных затрат.

Научная новизна имитационной модели заключается в возможности не только обнаружения деструктивного воздействия на АИС, но и восстановления ее работоспособного состояния за счет реконfigurирования. В единую модель объединены генерация разнородных журналов auditd, АСО и прикладного программного обеспечения передачи информации, построение штатного профиля интенсивности событий, последовательный анализ Вальда, классификация характера воздействия и выбор рациональной конфигурации защиты.

Практическая значимость работы состоит в том, что модель позволяет проводить вычислительные эксперименты без вмешательства в реальную автоматизированную информационную систему. С ее помощью можно оценивать влияние длительности окна агрегации и выбранных конфигураций безопасности на скорость обнаружения воздействия, потенциальный ущерб и ресурсные затраты.

Структура имитационной модели и постановка задачи

Имитационная модель состоит из следующих основных компонентов, представленных в табл. 1. Особенностью модели является наличие обратной связи: выбранная рациональная конфигурация влияет на дальнейшую генерацию событий, снижая интенсивность потока и вероятность появления деструктивных признаков. Это позволяет имитировать не только обнаружение воздействия, но и последующее изменение поведения системы после реконfigurирования.

Таблица 1

Основные компоненты модели

Компонент	Назначение
Модуль генерации логов	Формирует штатные и нештатные события из системных журналов
Модуль парсинга	Извлекает временные метки, источники и типы событий из строк журналов
Модуль агрегации	Группирует события по временным окнам и рассчитывает признаки воздействия
Модуль штатного профиля	Строит зависимость штатной интенсивности $\lambda_0(t)$ от времени
Модуль анализа Вальда	Выполняет последовательную проверку гипотез H_0 и H_1
Модуль классификации	Определяет тип воздействия по весовым признакам
Модуль оптимизации конфигураций	Рассчитывает потенциальный ущерб, затраты, множество Парето и рациональную конфигурацию
Модуль обратной связи	Применяет выбранную конфигурацию к дальнейшей имитации потока событий
Графический интерфейс	Обеспечивает управление моделью, визуализацию данных и вывод результатов

Рассматривается АИС, в которой во времени формируется поток событий системных журналов. Источниками событий выступают журнал аудита операционной системы auditd, сообщения АСО и сообщения программного обеспечения передачи информации. Общая схема работы имитационной модели представлена на рис. 1.

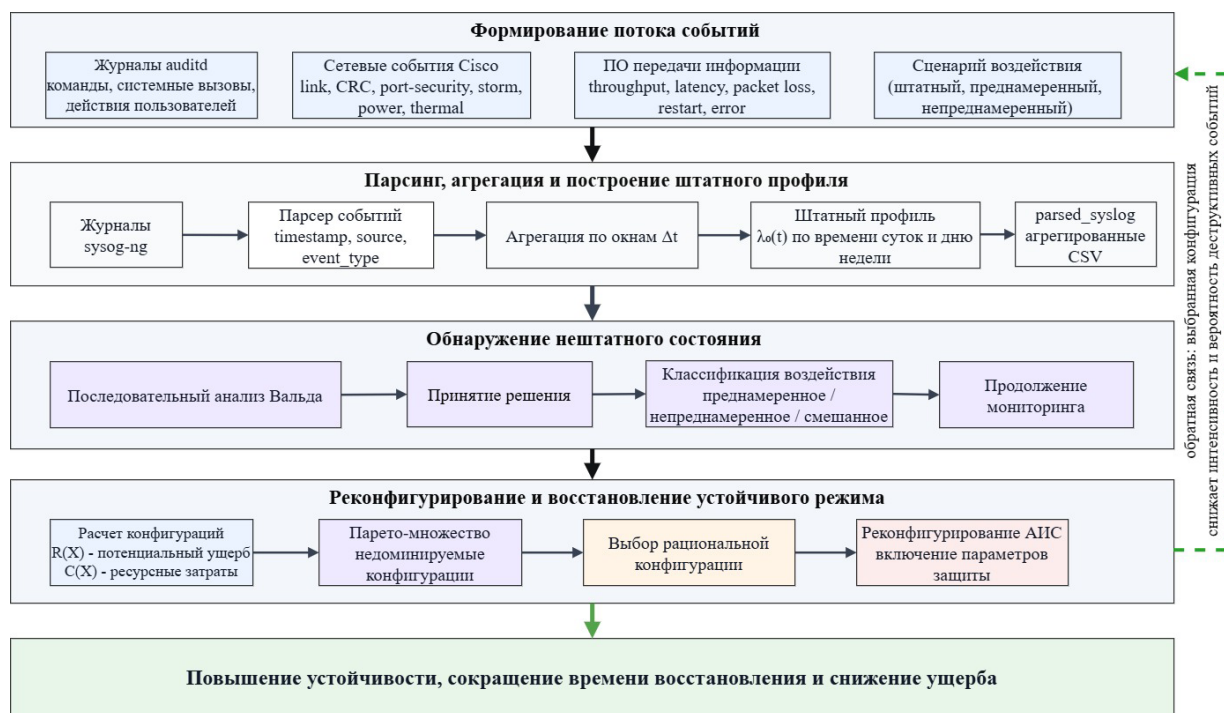


Рис. 1. Общая схема работы имитационной модели

С течением времени система может находиться в одном из трех состояний:

- штатное функционирование;
- преднамеренное деструктивное воздействие;
- непреднамеренное деструктивное воздействие.

Требуется:

- сформировать штатный профиль интенсивности значимых событий;
- обнаруживать переход в нештатное состояние;
- классифицировать характер воздействия;
- рассчитать допустимые конфигурации параметров безопасности;
- выделить множество Парето недоминируемых конфигураций;
- выбрать рациональную конфигурацию с учетом потенциального ущерба и вычислительных затрат;
- вывести результаты в виде таблиц и графиков.

Модель потока событий и моделируемые воздействия

Поток событий рассматривается по временным окнам длительностью Δt . Количество строк журналов в окне моделируется распределением Пуассона:

$$N(t) \sim \text{Poisson}(\lambda(t)).$$

Интенсивность штатного потока зависит от времени суток, дня недели и случайных колебаний:

$$\lambda(t) = \lambda_{\text{base}} \cdot K_{\text{day}}(t) \cdot K_{\text{week}}(t) \cdot K_{\text{trend}}(t),$$

где λ_{base} — базовая интенсивность;

$K_{\text{day}}(t)$ — суточный коэффициент активности;

$K_{\text{week}}(t)$ — недельный коэффициент активности;

$K_{\text{trend}}(t)$ — случайные малые колебания.

Табл. 2 содержит используемые коэффициенты генерации штатного потока.

Таблица 2

Коэффициенты генерации штатного потока

Параметр	Значение	Назначение
λ_{base}	65 событий за базовое окно 300 секунд	базовая интенсивность
K_{day}	1,7 с 09:00 до 18:00	повышенная дневная активность
K_{day}	0,55 с 00:00 до 06:00	пониженная ночная активность
K_{day}	1,0 в остальное время	средний режим
$K_{\text{week}}(t)$	1,0 в рабочие дни	обычная недельная активность
$K_{\text{week}}(t)$	0,65 в выходные дни	пониженная активность
$K_{\text{trend}}(t)$	1,0 + random (0; 0,12)	случайные малые колебания

В модели рассматриваются две основные группы деструктивных воздействий: преднамеренные и непреднамеренные. Преднамеренные воздействия связаны с действиями нарушителя, использованием сетевых утилит, попытками повышения привилегий и нарушением сетевого обмена. Непреднамеренные воздействия связаны с отказами оборудования, деградацией канала, питанием, перегревом и ошибками программного обеспечения.

После парсинга событий рассчитываются два весовых показателя:

$$\text{Sintentional} = 7 \cdot \text{audit_exec} + 6 \cdot \text{audit_privilege} + 5 \cdot \text{cisco_port_security} + 4 \cdot \text{cisco_storm};$$

$$\text{Sunintentional} = 6 \cdot \text{power_event} + 6 \cdot \text{thermal_event} + 5 \cdot \text{transmission_degradation} + 4 \cdot \text{cisco_crc} + 4 \cdot \text{cisco_link_down} + 3 \cdot \text{service_restart} + 3 \cdot \text{software_error}.$$

Эти показатели используются для классификации обнаруженного воздействия. Весовые признаки воздействия представлены в табл. 3.

Обнаружение воздействия последовательным анализом Вальда

Для обнаружения нештатного состояния используется последовательный анализ Вальда [8].

В каждом временном окне определяется количество значимых событий $x(t)$. По предварительно сформированной штатной неделе строится профиль ожидаемой интенсивности:

$$\lambda_0(t) = E[x(t)].$$

Проверяются две гипотезы:

$$H0: \lambda = \lambda_0(t),$$

$$H1: \lambda = \lambda_1(t) = k \cdot \lambda_0(t),$$

где k — коэффициент роста интенсивности при воздействии, который задает, насколько в гипотезе $H1$ поток «выше нормы».

Например, $k = 2,5$ означает: при $H1$ ожидается поток примерно в 2,5 раза выше, чем обычно.

При $k > 2,5$ система ожидает более сильную аномалию и может быть менее чувствительной к слабым отклонениям.

Если $1 < k < 2,5$, то система чувствительнее к небольшим отклонениям, но риск ложных срабатываний выше.

Для пуассоновского потока логарифм отношения правдоподобия имеет вид

$$\ln L = x \cdot \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_0} - (\lambda_1 - \lambda_0).$$

Таблица 3

Признаки воздействия

Признак	Вес	Тип воздействия	Обоснование
audit_exec	7	Преднамеренное	Запуск сетевых и системных утилит является сильным индикатором действий нарушителя
audit_privilege	6	Преднамеренное	Попытки повышения привилегий напрямую связаны с нарушением политики доступа
cisco_port_security	5	Преднамеренное	Признак появления нежелательного устройства или превышения ограничений
cisco_storm	4	Преднамеренное	Может указывать на сетевую атаку или неправильное подключение
power_event	6	Непреднамеренное	События питания часто приводят к отказу или деградации системы
thermal_event	6	Непреднамеренное	Перегрев оборудования является критическим эксплуатационным фактором
transmission_degradation	5	Непреднамеренное	Потери, задержки и снижение пропускной способности влияют на устойчивость обмена
cisco_crc	4	Непреднамеренное	CRC-ошибки отражают проблемы физического или канального уровня
cisco_link_down	4	Непреднамеренное	Падение интерфейса нарушает связность
service_restart	3	Непреднамеренное	Перезапуск службы может быть следствием сбоя
software_error	3	Непреднамеренное	Ошибки ПО указывают на нестабильность программного компонента

Накопленная статистика Вальда рассчитывается по формуле

$$S_n = S(n-1) + \ln L.$$

Пороги принятия решений определяются через вероятности ошибок первого и второго рода:

$$\ln A = \ln \frac{(1-\beta)}{\alpha}, \quad \ln B = \ln \frac{\beta}{(1-\alpha)}.$$

Правило принятия решения:

$S_n \geq \ln A$ — принимается гипотеза $H1$;

$S_n \leq \ln B$ — принимается гипотеза $H0$;

$\ln B < S_n < \ln A$ — продолжить наблюдение.

В этой имитационной модели включение признака воздействия не приводит к мгновенному принятию гипотезы $H1$. Включение режима воздействия меняет вероятностные характеристики генератора событий, но конкретное число событий в окне остается случайной величиной. Поэтому статистика Вальда накапливает доказательства постепенно. Если в одном окне число значимых событий близко к штатному уровню, вклад $\ln L$ может быть отрицательным и S_n уменьшится.

Параметры последовательного анализа Вальда представлены в табл. 4.

Для наглядности в интерфейсе отображается не только S_n , но и $\ln L$. Это позволяет видеть, какое именно окно сдвинуло статистику к гипотезе $H1$ или, наоборот, к $H0$.

Параметры реконфигурирования

После обнаружения нештатного состояния модель переходит к выбору конфигурации защиты. В рассматриваемой имитационной модели используются 26 параметров конфигурации (табл. 5), включающих усиленный аудит, межсетевую фильтрацию, IPS, криптографические механизмы, маршрутизацию и средства сетевой телеметрии.

Условные затраты C_i отражают вычислительную и эксплуатационную цену включения параметра (нагрузку на процессор, возможное снижение пропускной способности, сложность сопровождения и влияние на сетевой обмен).

Таблица 4

Параметры последовательного анализа Вальда

Параметр	Смысл	Влияние на модель
α	Вероятность ложной тревоги	Чем меньше α , тем выше верхний порог $\ln A$ и тем сложнее принять $H1$
β	Вероятность пропуска воздействия	Чем меньше β , тем ниже допустимость пропуска, но выше требовательность критерия
k	Ожидаемый рост интенсивности при $H1$	Определяет, насколько сильное отклонение ожидает анализатор
$\lambda_0(t)$	Штатная интенсивность	Рассчитывается по baseline-профилю
$\lambda_1(t)$	Интенсивность при воздействии	Рассчитывается как $k \cdot \lambda_0(t)$
$\ln L$	Вклад текущего окна	Показывает, увеличивает или уменьшает окно статистику S_n
S_n	Накопленная статистика	Используется для принятия $H0$ или $H1$

Таблица 5

Параметры конфигурации безопасности

Параметр	Назначение	Тип	Условные затраты C_i
Усиленный auditd	Расширенное журналирование команд, системных вызовов и действий пользователей	Аудит/обнаружение	7
Zone-Based Firewall (ZBFW)	Межсетевой экран L3–L7	Защита сети	38
CBAC stateful firewall	Stateful firewall старого типа	Защита сети	30

Окончание табл. 5

Параметр	Назначение	Тип	Условные затраты C_i
IOS IPS	Сигнатурное обнаружение и блокирование атак	IDS/IPS	62
IPsec AES-256/SHA-256 software	Программное шифрование трафика	Криптозащита	75
IPsec с AIM-VPN	Шифрование с аппаратным ускорителем	Криптозащита	35
PFS DH group	Обеспечение секретности сеансовых ключей	Криптозащита	14
GRE over IPsec	Защищенный туннель с инкапсуляцией	Туннель/криптозащита	78
DMVPN mGRE + NHRP + IPsec	Динамический защищенный оверлей	Туннель/криптозащита	86
L2TP/IPsec	L2-туннель с IPsec	Туннель/криптозащита	70
IPsec compression LZS	Сжатие трафика внутри IPsec	Оптимизация	50
Debug logging по трафику	Подробное отладочное логирование сетевого трафика	Аудит/диагностика	42
TCP intercept/inspect	Защита от SYN flood и инспекция TCP	Защита сети	24
Policy-Based Routing	Маршрутизация по правилам	Управление маршрутом	14
QoS classification NBAR	DPI-классификация трафика	QoS/анализ	16
NetFlow v9/IPFIX export	Экспорт телеметрии потоков	Мониторинг	13
Shaping 25M	Формирование трафика до 25 Мбит/с	QoS/ограничение	20
Policing 30M малый burst	Жесткое ограничение трафика	QoS/ограничение	16
NAT/PAT overload	Трансляция адресов	Сетевая функция	11
NAT ALG FTP/SIP	Инспекция прикладных протоколов FTP/SIP	NAT/инспекция	9
MPLS LFIB labels	Маркировка и пересылка MPLS	Маршрутизация	11
VRF MPLS/VPN lite	Разделение таблиц маршрутизации	Сегментация	8
uRPF antispoofing	Антиспуфинг источника пакетов	Защита сети	9
ACL расширенные	Фильтрация L3/L4 по адресам, портам и протоколам	Защита сети	7
OSPF area timers	Динамическая маршрутизация OSPF	Маршрутизация	5
BGP edge	Граничная динамическая маршрутизация	Маршрутизация	8

Расчет потенциального ущерба и затрат

Множество параметров конфигурации безопасности X включает настройки и механизмы средств защиты информации, которые могут быть активированы или отключены в зависимости от состояния системы и характера воздействия [9].

x_i — бинарная переменная, определяющая i -й параметр конфигурации безопасности системы,

которая принимает значение, равное 1, если параметр применен в конфигурации, и 0 в обратном случае (параметр отключен), $x_i \in \{0, 1\}$. Под совокупностью возможных к использованию параметров безопасности в общем их количестве n будем понимать структуру вида $X_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, где параметр данной их конфигурации определен в момент времени t и может быть настроен (включен)

в том числе удаленно. Тогда конкретная конфигурация безопасности задается вектором

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t)\}.$$

Для конфигурации X рассчитывается суммарная защищенность системы от j -го деструктивного воздействия при активированном i -м параметре безопасности:

$$E_{ji}(X) = \sum E_{ji} \cdot x_i.$$

Значение защищенности ограничивается сверху:

$$E_{ji}(X) \leq 0,92.$$

Такое ограничение введено потому, что модель не рассматривает защиту как абсолютную: даже при включении большого числа механизмов остаточный риск сохраняется.

Остаточный потенциальный ущерб после применения конфигурации:

$$R(X) = \sum P_j \cdot D_j \cdot (1 - E_{ji}(X)),$$

где P_j — вероятность j -й угрозы;

D_j — ущерб от j -й угрозы;

E_{ji} — степень защищенности i -го параметра против j -й угрозы;

x_i — включение i -го параметра.

Затраты на применение конфигурации:

$$C(X) = \sum C_i \cdot x_i,$$

где C_i — условная стоимость параметра защиты.

В табл. 6 представлены рассматриваемые типовые воздействия для расчета потенциального ущерба.

Суммарный ожидаемый потенциальный ущерб без дополнительных мер защиты составляет 85,7. Именно поэтому штатная конфигурация, в которой все рассматриваемые параметры выключены, имеет максимальный нормированный потенциальный ущерб среди сравниваемых решений.

Результативность защиты

Матрица защищенности [9] задает вклад каждого параметра в снижение конкретной угрозы. Данная величина количественно характеризует результативность использования соответствующего параметра и принимает значения в диапазоне от 0 до 1. В табл. 7 приведены только ненулевые значения матрицы.

В модели используется не полный перебор параметров для формирования вариантов конфигураций, а ограниченное множество допустимых конфигураций. Такой подход ближе к практической эксплуатации (администратор безопасности обычно выбирает не произвольный набор команд, а один из осмысленных профилей). Дополнительно генерируются случайные комбинации, расширяющие поисковое пространство.

Таблица 6

Рассматриваемые деструктивные воздействия

Воздействие	Класс	Вероятность P_j	Ущерб D_j	Исходный ожидаемый ущерб $P_j \cdot D_j$
Несанкционированное использование системных и сетевых утилит	Антропогенный	0,40	80	32,0
Нарушение сетевого обмена из-за действий нарушителя	Антропогенный	0,25	70	17,5
Отказ ПО передачи информации	Техногенный	0,25	50	12,5
Обрыв или деградация канала связи	Техногенный	0,15	40	6,0
Скачки напряжения и отключение питания	Техногенный	0,18	65	11,7
Перегрев передающего или сетевого оборудования	Стихийный	0,10	60	6,0

Таблица 7

Результативность параметров защиты

Воздействие	Параметр	Степень защищенности E_{ji}
Несанкционированное использование утилит	Усиленный auditd	0,30
	ZBFW	0,35
	CBAC	0,22
	IOS IPS	0,42
	Debug logging	0,18
	TCP intercept	0,25
	PBR	0,20
	NetFlow	0,18
	uRPF	0,25
	ACL расширенные	0,28
Нарушение сетевого обмена нарушителем	Усиленный auditd	0,12
	ZBFW	0,32
	IOS IPS	0,35
	GRE over IPsec	0,28
	DMVPN	0,30
	TCP intercept	0,30
	PBR	0,25
	NBAR	0,20
	NetFlow	0,20
	uRPF	0,30
Отказ ПО передачи информации	Усиленный auditd	0,10
	Debug logging	0,12
	NBAR	0,18
	NetFlow	0,25
	Shaping	0,20
	Policing	0,18
	OSPF	0,12
	BGP	0,10
Деградация канала связи	IPsec с AIM–VPN	0,25
	DMVPN	0,28
	PBR	0,18
	NBAR	0,25
	Shaping	0,38
	Policing	0,25
	MPLS	0,18
	VRF	0,22
	OSPF	0,20
	BGP	0,20

Окончание табл. 7

Воздействие	Параметр	Степень защищенности E_{ji}
Скачки напряжения и питание	Усиленный auditd	0,08
	DMVPN	0,18
	PBR	0,15
	NetFlow	0,18
	Shaping	0,20
	MPLS	0,15
	VRF	0,18
	OSPF	0,15
	BGP	0,15
Перегрев оборудования	Усиленный auditd	0,05
	NBAR	0,15
	NetFlow	0,18

Анализ Парето и выбор рациональной конфигурации

На рис. 2 показан пример множества Парето-конфигураций системы защиты. Серые точки соответствуют всем допустимым конфигурациям, синие — недоминируемым конфигурациям. Синим крестом выделена штатная конфигурация, звездой — рациональная конфигурация. Оранжевый круг — выбранная конфигурация, зеленый круг — активная конфигурация.

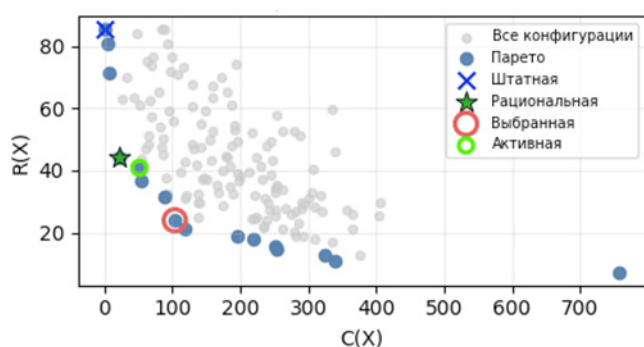


Рис. 2. Отображение множества Парето в интерфейсе модели

После расчета потенциального ущерба $R(X)$ и вычислительных затрат $C(X)$ для всех допустимых вариантов выделяется множество Парето. Конфигурация исключается, если существует другая конфигурация, которая имеет не больший остаточный ущерб, не большие затраты и строго лучше хотя бы по одному критерию [10, 11].

Далее выполняется нормирование критериев:

$$R_n(X) = \frac{(R(X) - R_{\min})}{(R_{\max} - R_{\min})}, \quad C_n(X) = \frac{(C(X) - C_{\min})}{(C_{\max} - C_{\min})}.$$

Рациональная конфигурация выбирается по функции:

$$F(X) = (1-a) \cdot R_n(X) + a \cdot C_n(X),$$

где a — вес вычислительных затрат. При малом a модель предпочитает сильное снижение ущерба, при большом a — более экономные конфигурации.

Результаты имитационного эксперимента

На рис. 3 показан пример фрагмента окна мониторинга функционирования АИС. Поток событий, влияющий на защищенность АИС, имеет дискретную природу и изменяется по окнам.

В ходе эксперимента была сформирована неделя штатных логов, построен базовый профиль $\lambda_0(t)$, после чего был запущен мониторинг с окном агрегации 3 секунды. На графиках отображались:

- поток значимых событий после парсинга;
- штатное ожидание $\lambda_0(t)$;
- адаптивный порог $\lambda_0(t) + 3\sigma\lambda_0(t)$;
- накопленная статистика Вальда S_n ;
- верхний и нижний пороги принятия решений.

Полученные результаты показывают, что статистика Вальда не реагирует мгновенно на включение

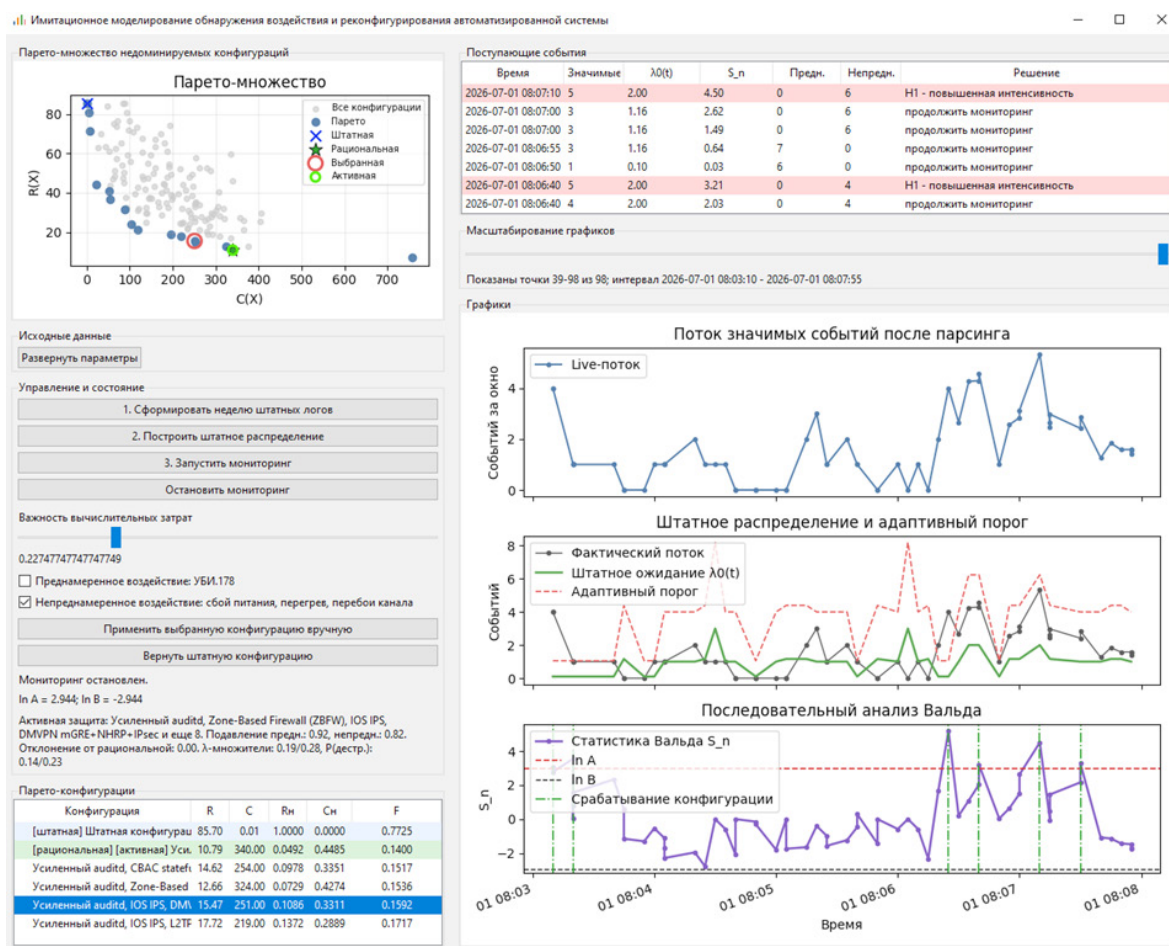


Рис. 3. Динамика значимых событий, адаптивного порога и статистики Вальда

режима воздействия. Это соответствует сути последовательного критерия: решение принимается не по факту включения сценария, а по накопленному статистическому отличию наблюдаемого потока от штатного профиля. В отдельном окне вклад $\ln L$ может быть положительным или отрицательным. Если число значимых событий выше ожидаемого, S_n растет. Если поток близок к штатному, статистика снижается или сбрасывается при принятии H_0 .

В табл. 8 приведен пример интерпретации одного шага анализа Вальда.

После принятия H_1 модель позволяет выбрать рациональную конфигурацию и применять ее к дальнейшей генерации событий.

Проведенное моделирование показывает существенное влияние выбора параметров окна агрегации и коэффициента k на принятие решений.

Коэффициент k задает ожидаемый рост интенсивности при воздействии. Если k слишком велик, анализатор ожидает резкий скачок потока и может

медленнее реагировать на слабые воздействия. Если k мал, модель становится чувствительнее, но возрастает риск ложной тревоги.

Анализ Парето показывает, что максимальная конфигурация не всегда является рациональной. Несмотря на минимальный потенциальный ущерб, она может иметь чрезмерно высокие ресурсные затраты. Поэтому практически значимым является поиск недоминируемых решений, находящихся между штатным режимом и максимальным включением всех параметров.

Отличительной особенностью модели является наличие обратной связи: выбранная конфигурация влияет на дальнейшее течение имитационного процесса, снижая интенсивность деструктивных событий и остаточный ущерб. За счет этого модель позволяет исследовать не только момент обнаружения нештатного состояния, но и переход системы к более устойчивому режиму после применения защитных параметров.

Пример интерпретации одного шага анализа Вальда

Показатель	Пример значения	Описание
s	3	Значимых событий в текущем окне
$\lambda_0(t)$	1	Ожидаемое штатное значение
k	2,5	Ожидаемый рост интенсивности при воздействии
$\lambda_1(t)$	2,5	Интенсивность по гипотезе $H1$
$\ln L$	1,25	Текущее окно сдвигает статистику к $H1$
S_n	2,1	Накопленная статистика
$\ln A$	2,94 при $\alpha = 0,05, \beta = 0,05$	Верхний порог принятия $H1$
Решение	Продолжить наблюдение	Доказательства пока недостаточно для $H1$

Заключение

В работе представлена имитационная модель автоматизированной информационной системы в условиях деструктивных воздействий. Модель воспроизводит поток событий журналов системы, строит штатное распределение интенсивности, обнаруживает нештатное состояние по последовательному анализу Вальда и выполняет выбор рациональной конфигурации защиты на основе анализа Парето.

Предложенный подход позволяет исследовать не только момент обнаружения воздействия, но и последующую реакцию системы. Это делает мо-

дель пригодной для анализа устойчивости автоматизированных систем, оценки вариантов реконфигурирования и исследования компромисса между снижением потенциального ущерба и ростом вычислительных затрат.

Дальнейшее развитие модели может быть связано с использованием реальных журналов событий, расширением набора источников данных, добавлением вероятностной классификации типа воздействия и применением ситуационного подхода реконфигурирования системы в зависимости от текущего режима функционирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ефимова Ю. В., Гаврилов А. Г. Моделирование системы информационной безопасности на основе анализа системных журналов // Инженерный вестник Дона. 2019. № 6 (57). 11 с.
2. Малюк А. А., Пазизин С. В., Погужин Н. С. Введение в защиту информации в автоматизированных системах: учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия — Телеком, 2001. 147 с.
3. Анализ решений в области средств защиты информации в автоматизированной системе / К. В. Стародубов [и др.] // Проектное управление в строительстве. 2023. № 2 (29). С. 81–85.
4. Баринов А. Е., Богер А. М. Классификация каналов деструктивного информационного воздействия на программируемые логические контроллеры сетей АСУ ТП // Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития (ЦИСП-2023): сборник статей Всероссийской научной конференции с международным участием (Челябинск, Россия, 21–23 ноября 2023 г.). Челябинск: Издательский центр Южно-Уральского гос. ун-та, 2024. С. 88–94.
5. Попов А. М., Филатов В. И. Устойчивость распределенной автоматизированной системы управления с учетом модели прогнозирования последствий непреднамеренных деструктивных воздействий // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2024. № 4. С. 84–89. DOI: 10.31857/S0235711924040111
6. Optimal Security Hardening on Attack Tree Models of Networks: A Cost-Benefit Analysis / R. Dewri [et al.] // International Journal of Information Security. 2012. Vol. 11, iss. 3. Pp. 167–188. DOI: 10.1007/s10207-012-0160-y

7. Кротова Е. Л., Андреев Р. А., Андреева П. А. Обзор методов статической и динамической кластеризации журналов событий безопасности // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 4-1 (106). С. 32–35. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.005
8. Вальд А. Последовательный анализ = Sequential Analysis / пер. с англ. П. А. Бакута [и др.]; под ред. Б. А. Севастьянова. М.: Физматгиз, 1960. 328 с.
9. Неаскин С. Р., Соловьев И. А. Математическая модель управления конфигурацией безопасности автоматизированной системы в условиях деструктивных воздействий // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2025. Вып. 698. С. 245–258.
10. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 256 с.
11. Москвин Б. В. Теория принятия решений: учебник. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2014. 364 с.

Дата поступления: 07.08.2026

Решение о публикации: 24.08.2026

An Imitation Model for Ensuring the Security of an Automated Information System Based on Reconfiguring the Protection System Parameters

Alexander G. Basyrov — Dr. Sci. in Engineering, Full Professor. Professor of the Department of Information and Computing Systems and Networks. Research interests: modeling of information systems.
E-mail: alexanderbas@mail.ru

Stanislav R. Neaskin — Adjunct at the Military Institute (Research). Research interests: information security.
E-mail: stasneas@bk.ru

Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13 Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

For citation: Basyrov A. G., Neaskin S. R. An Imitation Model for Ensuring the Security of an Automated Information System Based on Reconfiguring the Protection System Parameters, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 3 (47), pp. 5–17. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-5-17 (In Russian)

Abstract. *The study presents research devoted to the development of a simulation model of an automated information system under normal load conditions and destructive influences. **Purpose:** is to improve the system's resilience by timely detection of abnormal conditions and subsequent reconfiguration of protection parameters. **Methods:** simulation modeling, sequential Wald analysis, Pareto analysis, and weighted aggregation of criteria for potential damage and resource costs. **Results:** show that the model makes it possible to generate a standard event profile, identify deviations in system log flows, classify the nature of the impact, and select an optimal protection configuration. **Practical significance:** lies in reducing the time required to restore system functionality and minimizing potential damage in the event of destructive impacts. Further development of the model is related to expanding the range of event sources and refining the parameters for assessing potential damage. The research can be used in the analysis of the stability and security of automated systems.*

Keywords: *automated information system, sequential Wald analysis, Pareto set, reconfiguration, system event logs*

REFERENCES

1. Efimova J. V., Gavrilov A. G. Modelirovanie sistemy informatsionnoy bezopasnosti na osnove analiza sistemnykh zhurnalov [Modeling of Information Security System Based on Analysis of System Logs], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2019, no. 6 (57), 11 p. (In Russian)
2. Malyuk A. A., Pazizin S. V., Pogozhin N. S. Vvedenie v zashchitu informatsii v avtomatizirovannykh sistemakh: uchebnoe posobie dlya vuzov [Introduction to Information Security in Automated Systems: A Textbook for Universities]. Moscow, "Goryachaya liniya — Telekom" Publishing House, 2001, 147 p. (In Russian)
3. Starodubov K. V., et al. Analiz resheniy v oblasti sredstv zashchity informatsii v avtomatizirovannoy sisteme [Analysis of Solutions in the Field of Information Security in an Automated System], *Proektnoe upravlenie v stroitelstve*, 2023, no. 2 (29), pp. 81–85. (In Russian)
4. Barinov A. E., Boger A. M. Klassifikatsiya kanalov destruktivnogo informatsionnogo vozdeystviya na programmiruemye logicheskie kontroly setey ASU TP [Classification of Channels of Destructive Information Impact on Programmable Logic Controllers of Automated Process Control Systems], *Tsifrovaya industriya: sostoyaniye i perspektivy razvitiya (TsISP'2023): sbornik statey Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [The 2023 Global Smart Industry Conference (GloSIC'2023): Collection of Articles from the All-Russian Scientific Conference with International Participation]*, Chelyabinsk, Russia, November 21–23, 2023. Chelyabinsk: Publishing Center of the South Ural State University, 2024, pp. 88–94. (In Russian)
5. Popov A. M., Filatov V. I. Ustoychivost raspredelennoy avtomatizirovannoy sistemy upravleniya s uchetom modeli prognozirovaniya posledstviy neprednamerennykh destruktivnykh vozdeystviy [Stability of a Distributed Automated Control System Taken into Account in a Model for Predicting the Consequences of Unintentional Destructive Impacts], *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2024, no. 4, pp. 84–89. DOI: 10.31857/S0235711924040111 (In Russian)
6. Dewri R., et al. Optimal Security Hardening on Attack Tree Models of Networks: A Cost-Benefit Analysis, *International Journal of Information Security*, 2012, vol. 11, iss. 3, pp. 167–188. DOI: 10.1007/s10207-012-0160-y
7. Krotova E. L., Andreev R. A., Andreeva P. A. Obzor metodov staticheskoy i dinamicheskoy klasterizatsii zhurnalov sobytiy bezopasnosti [Overview of Methods for Static and Dynamic Clustering of Security Event Logs], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Research Journal]*, 2021, no. 4-1 (106), pp. 32–35. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.005 (In Russian)
8. Wald A. Posledovatelnyy analiz [Sequential Analysis]. Moscow, Fizmatgiz Publishing House, 1960, 328 p. (In Russian).
9. Neaskin S. R., Solovyov I. A. Matematicheskaya model upravleniya konfiguratsiey bezopasnosti avtomatizirovannoy sistemy v usloviyakh destruktivnykh vozdeystviy [A Mathematical Model for Managing the Security Configuration of an Automated System under Conditions of Destructive Influences], *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhayskogo [Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy]*, 2025, iss. 698, pp. 245–258. (In Russian)
10. Podinovskiy V. V., Nogin V. D. Pareto-optimalnye resheniya mnogokriterialnykh zadach [Pareto-Optimal Solutions to Multi-Criteria Problems]. Moscow, Nauka Publishers, 1982, 256 p. (In Russian)
11. Moskvina B. V. Teoriya prinyatiya resheniy: uchebnik [The Theory of Decision-Making: A Textbook]. Saint Petersburg, Mozhaisky Military Aerospace Academy, 2014, 364 p. (In Russian)

Received: August 07, 2026

Accepted: August 24, 2026

УДК 004.051

Формирование разделяющих поверхностей классов технических состояний в задачах обучения интеллектуальных агентов диагностики

- Барановский Анатолий Михайлович** — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационно-управляющие системы, диагностирование и управление техническим состоянием, нейронные сети. E-mail: bamvka@mail.ru
- Бобриков Даниил Алексеевич** — магистр, аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных. E-mail: daniil20001210@mail.ru
- Молодкин Игорь Андреевич** — магистр, старший преподаватель кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: сети и телекоммуникации, разработка ПО, обработка больших данных. E-mail: molodkin@pgups.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Барановский А. М., Бобриков Д. А., Молодкин И. А. Формирование разделяющих поверхностей классов технических состояний в задачах обучения интеллектуальных агентов диагностики // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 3 (47). С. 18–34. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-18-34

Аннотация. Увеличение сложности информационно-управляющих систем (ИУС) и объемов телеметрической информации требует перехода от традиционных централизованных схем диагностики к интеллектуальным распределенным системам, обладающим адаптивностью и масштабностью. Одной из ключевых задач создания такого рода решений является формализация процессов формирования областей и разделяющих поверхностей технических состояний. **Цель:** разработка математической модели и алгоритмов формирования областей и разделяющих поверхностей технических состояний в процессе обучения прототипа интеллектуальной системы, способной к самообучению и предиктивной оценке технического состояния оборудования в условиях большого потока диагностических данных. **Методы:** предложен подход, сочетающий многоагентную организацию компонентов, реализацию распределенной потоковой обработки информации с применением нейросетевых и пороговых методов, а также использование инфраструктуры Big Data для хранения, агрегации и анализа данных. Проведена формализация диагностической задачи, построены алгоритмы формирования областей и разделяющих поверхностей технических состояний, прогнозирования и оценки вероятности отказа, реализован прототип на вычислительной платформе. **Результаты:** сформирована архитектура интеллектуальной ИУС, в которую входят агенты сбора, предобработки и анализа данных, модуль прогноза на базе LSTM, агент принятия решений и интерфейсы взаимодействия с оператором. Представлены расчеты, демонстрирующие повышение достоверности диагностики при увеличении объема данных. Реализованы сценарии обработки телеметрии в реальном времени. **Практическая значимость:** полученные в ходе эксперимента результаты свидетельствуют об эффективности предлагаемого подхода. Описаны возможности масштабирования системы, ее внедрения в существующую транспортную инфраструктуру для обеспечения отказоустойчивости и автономности.

Ключевые слова: мультиагентные системы, нейросетевые технологии, транспорт, информационно-управляющие системы, автоматизация

1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки);

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

Введение

Современный этап развития интеллектуальных транспортных систем неразрывно связан с проблемой обеспечения отказоустойчивости информационно-управляющих систем (ИУС). Именно эти комплексы выполняют функции центрального звена в контуре управления автономным подвижным составом, включая и железнодорожный транспорт. Реальная эксплуатация такого оборудования сопряжена с комплексом неблагоприятных воздействий: вибрации, перепады температур, цикличность нагрузок — все это существенно снижает эффективность традиционных диагностических методик. Классические подходы, ориентированные на периодический контроль, зачастую оказываются недостаточно оперативными и плохо адаптируются к динамике изменения параметров. В этом контексте на первый план выходит задача предиктивной диагностики, то есть заблаговременного обнаружения признаков зарождающихся дефектов, позволяющего предотвратить развитие аварийных ситуаций.

Одним из перспективных направлений здесь является использование мультиагентных систем, построенных как совокупность взаимодействующих программных модулей. Такая архитектура дает возможность рассредоточить функции сбора и обработки данных, что существенно повышает живучесть и адаптивность системы в целом. Если же дополнить агентный подход нейросетевыми алгоритмами, возникает синергетический эффект: появляется возможность не просто фиксировать текущие показатели, но и выявлять скрытые паттерны в потоках телеметрии, обучаясь на реальных сценариях работы оборудования. Именно сочетание этих двух технологических направлений — распределенного интеллекта и глубокого анализа данных — формирует предпосылки для создания действительно эффективных диагностических комплексов нового поколения.

Однако для полноценной реализации такого подхода необходима строгая математическая формализация процессов диагностики и восстановления, которая учитывает как динамический характер информации, так и распределенную структуру самой системы.

Основное внимание в статье уделяется построению математической модели диагностики технического состояния (ТС) компонентов ИУС, а также разработке алгоритмов, реализующих ключевые функции интеллектуального мониторинга в рамках многоагентной архитектуры. Модель ориентирована на обработку текущих данных измерений, выявление отклонений от номинального поведения, а также принятие решений с учетом неопределенности и взаимосвязей между элементами системы. Предлагаемые решения направлены на повышение автономности, достоверности и оперативности диагностики, а также на возможность масштабного применения в реальных условиях эксплуатации автономных подвижных объектов [1, 2].

Постановка задачи

Современные ИУС автономных подвижных объектов включают в себя множество взаимосвязанных вычислительных, исполнительных и сенсорных компонентов, от бесперебойной работы которых зависит функционирование всего транспортного средства. Учитывая сложность архитектуры и критичность задач, которые выполняют эти компоненты, крайне важно обеспечить не только своевременное выявление отказов, но и предиктивное предупреждение об их возникновении и проактивное управление техническим состоянием ИУС, под которым понимается совокупность свойств объекта, характеризующая его функциональную пригодность.

Более точно ТС можно выразить через параметры ИУС как объекта диагностирования (ОД), которые образуют вектор

$$\mathbf{Z}_{<n>} = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T.$$

Параметры $z_i (i = \overline{1, n})$ могут быть обобщенными, но наиболее полно ТС можно описать через первичные параметры (когда z_i — сопротивление, емкость, индуктивность, момент, коэффициент трения, геометрические размеры, постоянная времени и т. п.). Вектор $\mathbf{Z}_{<n>}$ в некоторый момент времени в пространстве параметров есть точка.

Параметры разных ОД того же типа в тот же момент времени образуют область параметров. С течением времени размеры области могут меняться (обычно расширяться). Из-за отказов могут происходить скачкообразные изменения параметров, что эквивалентно попаданию вектора $\mathbf{Z}_{<n>}$ в новую область.

Объект контроля при диагностировании можно заставить в одной из областей $D_0, D_1, \dots, D_N$ в пространстве параметров (рис. 1). Здесь D_0 — область малых отклонений, определяемая статистическим разбросом параметров; D_i — дефектные области, вызванные отказами элементов (их размеры определяются также разбросом параметров); КО — критериальная область пригодности ОД, определяемая критерием качества ИУС.

Критериальная область может совпадать с областью работоспособности. Она может включать дефектные области (для резервированных систем)

и пересекать D_0 . Это означает, что отказ может наступить при плавном (постепенном) изменении вектора $\mathbf{Z}_{<n>}$.

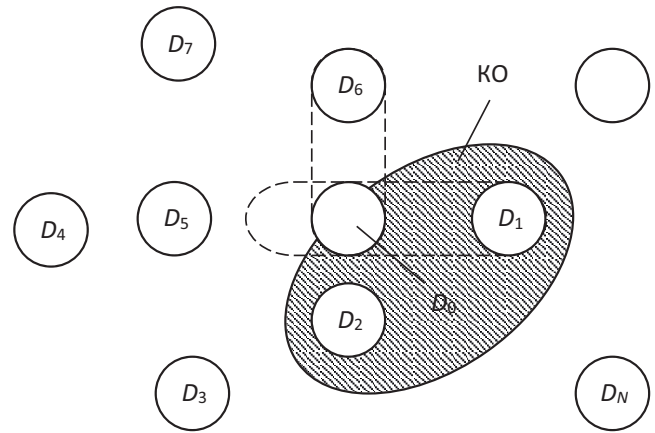


Рис. 1. Области состояний в пространстве параметров объекта диагностирования

Для эффективной эксплуатации ИУС необходимо своевременно и достоверно обнаруживать изменения ТС и активно воздействовать на объекты диагностирования с целью парирования отказов. Это возможно лишь при наличии интеллектуальных алгоритмов, способных правильно интерпретировать поток измерительной информации о контролируемых параметрах в реальном времени в рамках архитектуры многоагентной системы диагностики (рис. 2).

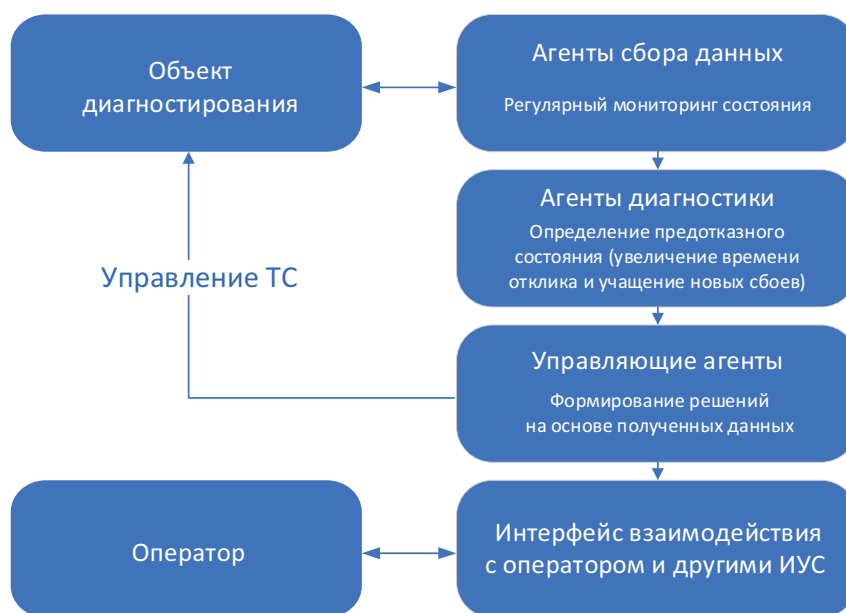


Рис. 2. Архитектура многоагентной системы диагностирования элементов ИУС

Задача, решаемая в рамках исследования, заключается в разработке математической модели, описывающей области состояний и поведение системы диагностирования (СД) в условиях эксплуатации.

В теории диагностики задачи оценивания ТС систем управления (СУ) в большинстве случаев формулируются как задачи идентификации динамических систем — оценивания их параметров [1]. При этом динамические свойства самой СД чаще всего не учитываются, рассматриваются лишь конечные показатели диагностического процесса — достоверность и оперативность. Это не позволяет сформулировать все классические свойства замкнутой системы <ИУС — СД> как динамической, например свойство устойчивости. Поэтому актуальной является задача разработки динамических диагностических моделей, на основе которых могут быть построены стратегии и конкретные алгоритмы диагностирования ИУС, обеспечивающие устойчивое (гарантированное) решение задачи диагностирования в условиях возможных структурно-параметрических нарушений и априорной неопределенности шумов и возмущений, действующих как внутри системы <ИУС — СД>, так и на ИУС как объект диагностирования.

В основе развиваемого подхода лежат следующие положения:

- существует единый математический аппарат описания структурно-параметрических возмущений (нарушений ТС) ИУС;
- процесс локализации множества дефектов носит гарантированный характер.

Вследствие этого искомая модель (динамическая система <ИУС — СД>) представляется как σ -алгебра некоторого множества. На основе этого определения могут быть введены понятия глубины, уровня локализации и других свойств процесса диагностирования исходной СУ. Для каждого элемента σ -алгебры контролируемой системы может быть составлена некоторая совокупность математических моделей, отражающих дифференциальные, динамические, интегральные свойства СУ, а также отдельных ее подсистем (элементов σ -алгебры) [3].

Сокращенная формализованная постановка задачи может быть следующей.

Даны:

1. Произвольная СУ (ИУС) Σ , состоящая из некоторого числа подсистем Σ_j , $j \in \overline{1, n}$ ($n \in N$), каждая из которых имеет σ_k^j , $k \in \overline{1, \ell_j}$ ($\ell_j \in N$) элементов. Функционирование системы происходит на временном интервале $T(\Sigma) = [t, v]$, $t < v < \infty$ под действием некоторой стратегии U .

2. Модели подсистем

$$\Sigma_j = \langle T, U, X, Y, X_0, Z, \eta, \chi, F, \Phi, H \rangle,$$

где T — множество моментов времени t , в которые наблюдается Σ_j ;

U, Y — множества входных $U_{\langle \rangle}$ и выходных $Y_{\langle \rangle}$ сигналов соответственно;

$X_{\langle \rangle}$ — множество состояний Σ_j ;

X_0 — множество начальных состояний;

$Z_{\langle \rangle}$ — вектор параметров СУ;

η — вектор случайных возмущений СУ;

χ — вектор шумов измерений;

F — оператор переходов, $F: T \times X \times U \times Z \times \eta \rightarrow X$;

Φ — оператор выходов, $\Phi: T \times X \times U \times Z \rightarrow Y$;

H — оператор управления, $H: T \times Y \times Z \times \chi \rightarrow U$.

3. Z_0 — базовый (номинальный или полученный на предыдущем цикле контроля) вектор параметров элементов системы Σ ;

S — множество рассматриваемых неисправностей в пространстве параметров $Z \in R^m$ элементов СУ, изменяющих операторы F, Φ, H .

4. Критерии работоспособности и дефектов СУ — характеристики (размеры) областей D_0, D_i, KO .

Ограничения:

1. Характеристики шумов и возмущений априори неизвестны.

2. В процессе контроля требуется обеспечить координатную устойчивость СУ: $\Delta X(t) \leq \Delta X^{(зад)}(t)$.

Необходимо:

А. Разработать обобщенную динамическую модель диагностического процесса системы <ИУС — СД>, включающую:

- начальное тестирование ИУС перед выходом на линию (до начала целевого применения);

- регулярный мониторинг технического состояния оборудования в процессе целевого функционирования;
- анализ отклонений признаков ТС от эталонных параметров, характеризующих исправное состояние ИУС;
- прогнозирование потенциальных сбоев и отказов на основе анализа временных рядов данных измерений признаков;
- классификацию текущего состояния системы и формирование рекомендаций для операторов ИУС или управляющих моделей проактивного автоматического вмешательства в процесс выполнения задач ИУС.

В. Сформулировать стратегии и разработать алгоритмы поиска дефектов ИУС.

В качестве частного примера типовых объектов диагностирования рассматривается вычислительная платформа ИУС: процессорные и графические блоки, система охлаждения, источники питания, устройства ввода-вывода, а также поддерживающая инфраструктура в виде аккумуляторов ИУС, логических соединений и операционной системы. Все эти элементы генерируют телеметрию — поток диагностических признаков (параметров), который должен быть обработан для выделения признаков потенциальных неисправностей.

Построение модели должно учитывать распределенную природу системы диагностирования: каждый агент имеет ограниченный круг задач и доступ к подмножеству данных. Это требует формализации взаимодействия между агентами, синхронизации их состояний, а также координации в процессе принятия решений. Таким образом, целью исследования является разработка формализованной схемы взаимодействий агентов и алгоритмического обеспечения для интеллектуальной диагностики в условиях реального времени с последующим принятием решений о необходимых действиях.

Математическая модель системы диагностики

В основе построения диагностической системы лежит концепция многоуровневого анализа данных результатов наблюдений (измерений).

Каждый агент в системе выполняет определенную функцию — от мониторинга до прогнозирования — и взаимодействует с другими через стандартизированные интерфейсы. Для завершения построения математической модели СД необходимо формализовать следующие аспекты:

1. Модель данных наблюдений

Пусть $Y(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)\}$ — вектор наблюдаемых параметров в момент времени t , где каждый $y_i(t)$ соответствует измеренному значению телеметрического параметра (температура процессора CPU, нагрузка GPU, напряжение на шине и т. п.).

Вектор эталонных значений в нормальных условиях обозначим как $Y^0 = \{y_1^0, y_2^0, \dots, y_n^0\}$.

Отклонение от нормы:

$$\Delta Y(t) = Y(t) - Y^0 = \{\delta_1(t), \delta_2(t), \dots, \delta_n(t)\}.$$

2. Модель функции диагностики состояния компонента

Для оценки состояния каждого элемента может использоваться функция

$$I_i(t) = \begin{cases} 0, & |\delta_i(t)| \leq \varepsilon_i \\ 1, & |\delta_i(t)| > \varepsilon_i, \end{cases}$$

где ε_i — порог чувствительности (допуск) для параметра y_i ;

$I_i(t)$ — бинарный индикатор потенциальной неисправности.

Для оценки общего состояния подсистемы используется агрегированная функция

$$I(t) = \sum_{i=1}^n w_i I_i(t),$$

где $w_i \in [0, 1]$ — вес значимости параметра.

При $I(t) \geq \theta$ (пороговое значение) система считается находящейся в предупредительном или отказном состоянии.

3. Модель прогнозирования отказа

Предсказывается динамика параметров с использованием авторегрессионной модели:

$$\hat{q}_i(t+1) = \sum_{k=1}^p a_{ik} q_i(t-k-1),$$

где a_{ik} — коэффициенты модели;

p — порядок авторегрессии.

Предотказное состояние фиксируется при превышении предсказанного значения:

$$|\hat{q}_i(t+1) - q_i^0| > \varepsilon_i.$$

Пример вычисления. Пусть анализируется температура процессора q_1 и частота вращения вентилятора q_2 .

Норма: $q_1^0 = 65^\circ\text{C}$, $q_2^0 = 2000$ об/мин.

Порог: $\varepsilon_1 = 10^\circ\text{C}$, $\varepsilon_2 = 500$ об/мин.

Измерения: $q_1(t) = 82^\circ\text{C}$, $q_2(t) = 1400$ об/мин,

$\delta_1(t) = 17^\circ\text{C} > \varepsilon_1 \Rightarrow I_1(t) = 1$,

$\delta_2(t) = -600$ об/мин $> -\varepsilon_2 \Rightarrow I_2(t) = 1$,

$S(t) = w_1 I_1(t) + w_2 I_2(t) =$

$= 0,6 \cdot 1 + 0,4 \cdot 1 = 1,0 \geq \theta = 0,7 \Rightarrow$

$\Rightarrow$ система в предупредительном состоянии.

4. Модель межагентного взаимодействия и синхронизации

Каждый агент A_j работает с локальным подмножеством параметров $Q_i(t) \subset Q(t)$ и передает свои оценки в координационный модуль, где происходит агрегация и принятие решения:

$$R(t) = F(I_1^j(t), \dots, I_m^j(t)) \text{ для всех } j.$$

Здесь функция F реализует правило большинства, взвешенную оценку или нейросетевой ансамбль (в зависимости от уровня) [4].

Использование технологии Big Data в интеллектуальной динамике диагностирования информационно-управляющих систем

Характеристики и источники данных в ИУС подвижного состава

Информационно-управляющие системы подвижного состава генерируют большие объемы данных. Различные технические компоненты ИУС отражают работу двигателей, тормозных систем, электроники, датчиков движения, навигации и климат-контроля. Эти данные поступают в виде непрерывных потоков результатов измерений, событийных логов, журналов ошибок, видеопотоков и аудиосигналов. Основу составляют также параметры окружающей среды (температура, влажность, давление), передаваемые в реальном времени.

Динамическая информация, циркулирующая в ИУС, отличается не только разнородностью, но и интенсивностью поступления. По оценкам,

каждый вагон генерирует от 2 до 5 Мбайт данных ежеминутно; для состава из 10 вагонов за восьмичасовую смену это уже превышает 1–2 Гбайт в сутки. Причем данные приходят асинхронно и в различных форматах (JSON, XML, двоичные потоки), что делает обязательной их предварительную нормализацию, очистку и агрегацию. Вычислительная нагрузка растет прямо пропорционально числу контролируемых параметров и частоте опросов [5].

К тому же нельзя не учитывать и различие временных масштабов процессов: одни показатели, например температура процессора или ток двигателя, меняются быстро и требуют частой фиксации, тогда как другие, например износ подшипников или деградация аккумуляторных батарей, проявляются на длительных интервалах. Это обстоятельство предъявляет повышенные требования к архитектуре обработки данных и вынуждает обращаться к Big Data-решениям, позволяющим работать как с оперативными потоками, так и с накопленными архивами.

Использование Big Data-платформ в задачах диагностики

Для обработки телеметрии и журналов событий, поступающих от бортовых ИУС, необходима инфраструктура, рассчитанная на работу с большими объемами в реальном времени. Обычные реляционные СУБД и монолитные схемы здесь практически бесполезны: они быстро перегружаются под большой нагрузкой, плохо масштабируются и не поддерживают распределенную обработку. Именно поэтому в современных разработках по интеллектуальной диагностике все чаще опираются на инструментарий Big Data.

На уровне хранения данных выбор обычно падает на распределенные файловые системы наподобие HDFS либо на облачные объектные хранилища, такие как Amazon S3 или Google Cloud Storage. Для организации потоковой передачи используют брокеры сообщений (Apache Kafka, MQTT или ZeroMQ), которые позволяют фильтровать и направлять события практически без задержек. Сами же вычислительные задачи решаются в средах вроде Apache Spark, Flink или Storm, где

предусмотрена параллельная обработка как непрерывных потоков, так и накопленных пакетов.

Важное место в такой архитектуре занимают ETL-конвейеры (англ. *Extract, Transform, Load* — «извлечение, преобразование, загрузка»), которые берут на себя предварительную подготовку: перекодировку форматов, фильтрацию помех, нормализацию и агрегацию показателей. Без этого этапа нейросетевые модели просто не получают входных данных приемлемого качества. Кроме того, современные платформы позволяют использовать подход *data lake*, когда сырые данные сохраняются в исходном виде, а их очистка и выборка выполняются уже на стадии анализа. Такой прием повышает гибкость и минимизирует потери информации.

В итоге использование Big Data-инфраструктуры дает возможность наращивать мощности системы диагностики без потери производительности, одинаково эффективно работать и с архивными записями, и с актуальными потоками, а также оперативно адаптировать алгоритмы при появлении новых модулей или датчиков на подвижном составе [6–8].

Влияние Big Data на эффективность нейросетевых моделей

Использование Big Data заметно улучшает работу нейросетевых алгоритмов, задействованных в интеллектуальной диагностике. Одно из главных достоинств здесь — возможность тренировать модели на объемных и представительных выборках, в которых присутствуют самые разные режимы функционирования объекта, от штатных до нештатных. Благодаря этому уменьшается опасность переобучения, повышается помехоустойчивость и появляется способность адекватно реагировать на ранее не встречавшиеся дефекты.

Для иллюстрации можно привести следующий пример. При обучении рекуррентной сети (типа LSTM или GRU) на сравнительно небольшом массиве из 10 000 записей точность прогноза температуры процессора достигала примерно 86 %. Когда же объем обучающей выборки увеличили до 100 000 записей, точность возросла на 12 %. Причина в том, что расширенный набор данных позволяет сети более тонко улавливать различия между

нормальной динамикой и аномалиями, в том числе теми, которые соответствуют начальным стадиям отказов, когда отклонения от нормы еще слабо выражены.

Математически прирост точности можно описать экспоненциальной зависимостью $T(N) = 1 - e^{-kN}$, где $T(N)$ — точность модели при обучающей выборке объема N , k — эмпирический коэффициент, зависящий от сложности задачи. При $k = 0,0002$ точность на 10 000 записей равна $T(10^4) = 1 - e^{-2} \approx 0,8647$, а на 100 000 записей — $T(10^5) = 1 - e^{-20} \approx 0,9817$.

Таким образом, практическое внедрение Big Data-подходов дает возможность непрерывно пополнять и уточнять обучающие выборки за счет свежих телеметрических записей, что в итоге позволяет дообучать модели по мере накопления информации. В сочетании с онлайн-мониторингом и распределенной агентной архитектурой такой механизм обеспечивает не только фиксацию текущего технического состояния, но и достаточно надежное прогнозирование вероятных сценариев развития отказов [9, 10].

Интеграция Big Data в многоагентную систему диагностики

В разрабатываемой мультиагентной архитектуре одним из центральных вопросов является организация распределенной обработки больших потоков диагностических данных. Совмещение принципов Big Data с агентной моделью дает заметный выигрыш в гибкости и масштабируемости, что особенно критично при работе с непрерывными и высокоинтенсивными телеметрическими потоками.

Каждый агент в такой системе ориентирован на выполнение строго очерченного круга задач: сбор первичной информации, ее фильтрацию и агрегирование, анализ журналов событий, нейросетевое прогнозирование или принятие решений. При этом все агенты взаимодействуют через распределенную шину сообщений, например на базе Apache Kafka. Подобная организация позволяет наращивать систему по мере подключения новых источников данных (дополнительных вагонов или типов датчиков) без перестройки уже работающих компонентов.

Для этого достаточно просто ввести в строй соответствующих агентов.

Для доступа к архивным записям агенты обращаются к общим хранилищам (HDFS или более традиционные решения), а также активно участвуют в потоковой обработке, что дает возможность одновременно оперативно реагировать на критические отклонения и обновлять модели по мере поступления свежих данных. Это служит основой для самообучения и адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации. Взаимодействие выстроено в соответствии со стандартами FIPA, что обеспечивает совместимость и легкость расширения платформы.

В итоге Big Data-инфраструктура органично вписывается в среду функционирования агентов, обеспечивая высокое быстродействие при обучении и диагностике, легкость масштабирования и устойчивость к сбоям даже при одновременной обработке разнородных массивов информации [11, 12].

Практические преимущества использования Big Data в интеллектуальной диагностике ИУС

Встраивание Big Data-решений в интеллектуальные системы диагностики и восстановления ИУС подвижного состава дает ощутимый практический выигрыш в части мониторинга, прогнозирования и выработки управленческих решений. Особенно этот эффект возрастает, когда Big Data работает в связке с мультиагентной архитектурой и нейросетевыми методами.

Прежде всего обработка больших массивов позволяет выявлять такие скрытые тенденции и предотказные состояния, которые при классическом пороговом контроле остаются незамеченными. Анализируя как накопленную историю, так и текущие телеметрические потоки, система способна предсказывать деградацию узлов (например, аккумуляторов или накопителей) до того, как отказ станет критическим. Это открывает путь к переходу от регламентных обслуживаний к проактивной стратегии, что сокращает затраты и уменьшает время вынужденного простоя составов.

Кроме того, накапливая статистику по множеству единиц подвижного состава, работающих в разнообразных условиях (например, разных

маршрутах, сезонах, нагрузках), становится возможным строить обобщенные модели типовых неисправностей и автоматически подстраивать диагностические пороги под конкретную обстановку. Особенно это ценно для техники, эксплуатируемой в географически разнесенных регионах, где внешние факторы сильно разнятся. Big Data здесь дает возможность аккумулировать опыт эксплуатации в масштабах всей сети, а не отдельных депо.

Наконец, применение Big Data-подходов позволяет существенно повысить степень автономности диагностических процессов. Большинство рутинных операций по приему, интерпретации и первичному анализу событий выполняется агентами без участия человека; вмешательство оператора требуется лишь при обнаружении значимых отклонений, когда формируются отчеты и рекомендации. Это не только разгружает персонал, но и ускоряет реакцию на угрозы, одновременно снижая зависимость от субъективных решений. Накопленная же статистика срабатываний и отказов служит надежной основой для последующей корректировки регламентов технического обслуживания [13].

Разработка алгоритмов диагностирования

Построение эффективных алгоритмов диагностирования требует сочетания логических правил, статистических методов обработки данных и интеллектуального анализа, основанного на машинном обучении. На основании разработанной математической модели реализуется несколько алгоритмов, ориентированных на выполнение, локализацию и прогнозирование неисправностей в вычислительной части ИУС подвижного состава.

Алгоритм первичной диагностики на основе порогового анализа

На первом уровне обработки измерений реализуется алгоритм порогового сравнения, описанный ранее. Он формирует бинарный диагностический вектор отклонений:

1. Получение текущих значений $Y(t)$.
2. Вычисление отклонений $\Delta Y(t) = Y(t) - Y^0$.
3. Сравнение с допустимыми программами ε_i для каждого параметра.

4. Построение вектора состояния $I(t) = \{I_1(t), I_2(t), \dots, I_n(t)\}$.

5. Формирование заключения о состоянии подсистемы.

Алгоритм прост, быстр и хорошо подходит для реального времени, однако его чувствительность ограничена, а предсказательные возможности отсутствуют. Поэтому для решения задачи предлагается строить многомерные области возможных технических состояний ИУС (рис. 1). Области состояний предлагается аппроксимировать многомерными эллипсоидами на основе потока измерений массива диагностических признаков, что позволяет обучать агентов по мере получения новых данных о возможных отказах.

Формирование областей состояний и разделяющих поверхностей для нейросетевого распознавания технических состояний систем управления диагностическим агентом на основе обновляемых данных Big Data

Накопление больших данных о поведении ИУС позволяет дообучать интеллектуальную систему диагностики — уточнять параметры многомерного образа ТС, соответствующего определенному дефекту диагностируемой ИУС.

Так, при условии получения реализации вектора признаков технического состояния $\Pi(Y)$ (измерений, оценок вектора параметров ИУС) апостериорная вероятность j -го внезапного отказа S_{bj} определяется согласно формуле Байеса:

$$P(S_{bj} / \Pi) = \frac{\varphi_{\hat{\Pi}}(\Pi / S_{bj}) P(S_{bj})}{\sum_{j=0}^k \varphi_{\hat{\Pi}}(\Pi / S_{bj}) P(S_{bj})}, \quad (1)$$

где $P(S_{bj})$ — априорная вероятность состояния S_{bj} .

При этом условные потери, связанные с принятием решения R_{bi} , могут быть вычислены следующим образом:

$$\Lambda(R_{bi} / \Pi) = \sum_{j=0}^k \lambda(R_{bi} / S_{bj}) P(S_{bj} / \Pi). \quad (2)$$

В качестве решающего правила используем функцию $\alpha_b(\Pi)$, которая дает возможность принять решение при любом возможном значении вектора

измеряемых параметров Π из области его существования. Функция $\alpha_b(\Pi)$ принимает одно из $k + 1$ значений множества решений R_b .

Средние потери выражаются зависимостью

$$\Lambda_{\text{ср}} = \int_{(D)} \Lambda(\alpha_b(\Pi) / \Pi) \sum_{j=0}^k \varphi_{\hat{\Pi}}(\Pi / S_{bj}),$$

где D — область существования вектора измеряемых параметров в пространстве признаков.

Минимизация средних потерь $\Lambda_{\text{ср}}$ обеспечивается выбором такого решающего правила, при котором выполняется условие

$$(\forall \Pi) \Lambda(\lambda_b(\Pi) / \Pi) = \min \{ \Lambda(R_{bi} / \Pi) \}, \quad i = 0(1)K.$$

Следовательно, байесовское решающее правило состоит в вычислении условного риска (2) для $i = 0, 1, 2, \dots, k$ и выборе решения R_{bi} , при котором условный риск минимален.

Если для рассматриваемой задачи распознавания k состояний ИУС в качестве функции потерь можно принять так называемую симметричную функцию потерь, связывающую правильные решения с отсутствием потерь и приписывающую единичные потери любым ошибкам:

$$\lambda(R_{bi} / S_{bj}) = \begin{cases} 0, & i = j \\ 1, & i \neq j, \quad i, j = 0, 1, \dots, k, \end{cases}$$

то в этом случае условные потери (2) совпадают с вероятностью ошибки распознавания ТС:

$$\Lambda(R_{bi} / \Pi) = 1 - P(S_{bi} / \Pi).$$

Тогда метод Байеса сводится к правилу минимизации уровня ошибок Зигерта — Котельникова, согласно которому принимается решение о распознавании состояния S_{bi} по максимальному значению апостериорной вероятности:

$$s \in S_{bi}, \text{ если } H(S_{bi} / \Pi) = \max \{ P(S_{bj} / \Pi) \}, \quad j = 0(1)k. \quad (3)$$

При этом в качестве разделяющих функций $q_{ij}(\Pi)$ в пространстве контролируемых параметров можно принять функции, обеспечивающие выделение областей значений признаков $\hat{\Pi}_j$, в которых для каждого состояния системы выполняется соотношение (3). Семейство разделяющих функций

$q_{ij}(\Pi)$ позволяет разбить пространство признаков на $k + 1$ областей состояний, по факту попадания в них полученного значения вектора измеряемых параметров Π принимается решение о состоянии диагностируемой системы.

Для вычисления разделяющих функций $q_{ij}(\Pi)$, согласно (1), необходимо определение априорных вероятностей $P(S_{bi})$ и условных плотностей распределения вектора измеряемых параметров $\varphi_{\Pi}(\Pi/S_{bi})$ при наблюдении каждого класса технических состояний S_{bi} , $i = 0, 1, 2, \dots, k$. Априорные вероятности $P(S_{bi})$ могут быть определены на основе опыта эксплуатации ИУС на предыдущих изделиях и анализа надежности узлов системы. В связи с отсутствием необходимой информации для выбора значений $P(S_{bi})$ часто все состояния принимают равновероятными. Такая модификация байесовского критерия позволяет избежать «подавления» маловероятных отказов.

В качестве условных плотностей распределения вектора измеряемых параметров $\varphi_{\Pi}(\Pi/S_{bi})$ можно использовать многомерные нормальные распределения, так как в соответствии с обобщенной центральной предельной теоремой они описывают распределение случайных величин, возникающих в результате суммарного воздействия многих независимых случайных факторов, влияние каждого из которых ничтожно.

При подобной аппроксимации условная плотность распределения измеряемых параметров Π характеризуется вектором математического ожидания $\bar{\Pi}$ и ковариационной матрицей M :

$$\varphi(\Pi/S_{bi}) = (2\pi)^{-d/2} |M_i|^{-1/2} \exp \left[-\frac{1}{2} (\Pi - \bar{\Pi}_i)^T M_i^{-1} (\Pi - \bar{\Pi}_i) \right],$$

где d — число признаков;

$\bar{\Pi}_i$ — среднее значение признаков для класса i ;

M_i — ковариационная матрица класса i ;

T — транспонирование.

Геометрический смысл состоит в том, что возможные значения вектора Π имеют тенденцию попадать в область пространства $\bar{\Pi}_i$ или кластер, центр которого определяется вектором математического ожидания $\bar{\Pi}_i (i = \bar{0}, \bar{k})$, а форма — ковариационной матрицей. Поверхности постоянной

плотности распределения имеют форму гиперэллипсоидов, задаваемых уравнением

$$(\Pi - \bar{\Pi}_i)^T M_i^{-1} (\Pi - \bar{\Pi}_i) = \zeta_{M_i}^2, \quad (4)$$

где ζ_{M_i} — махаланобисово расстояние от Π до $\bar{\Pi}_i$.

Мерой разброса возможных значений вектора Π относительно центра кластера служит вероятность того, что $(\Pi - \bar{\Pi}_i) \leq \zeta_{M_i}$, которая определяется объемом гиперэллипсоида, соответствующего ζ_{M_i} :

$$V = V_d \sqrt{|M_d|} \zeta_M^d,$$

$$V_d = \begin{cases} \frac{\pi}{|d/2|!!}, & d - \text{четное} \\ \frac{2^d \pi^{(d-1)/2} \left(\frac{d-1}{2}\right)!}{d!}, & d - \text{нечетное.} \end{cases}$$

Выполнение условия

$$P(S_{bi}/\Pi) > P(S_{bj}/\Pi)$$

достигается, если

$$q_{ij}(\Pi) = -\frac{1}{2} (\Pi - \bar{\Pi}_i)^T M_i^{-1} (\Pi - \bar{\Pi}_i) + \frac{1}{2} (\Pi - \bar{\Pi}_j)^T M_j^{-1} (\Pi - \bar{\Pi}_j) - \frac{1}{2} \log \left(\frac{|M_i|}{|M_j|} \right) > 0. \quad (5)$$

Таким образом, решение об i -м внезапном отказе ИУС $\alpha_b(\Pi) = R_{bi}$ принимается, если $q_{ij}(\Pi) > 0$, $\forall j \neq i$.

Ввиду того что случайный характер погрешностей измерений и разбросов параметров определяет ковариационные матрицы, последние можно предположить одинаковыми для всех кластеров, соответствующих множеству предусмотренных отказов. Геометрически это означает, что все кластеры имеют вид гиперэллипсоидальных областей одинаковых форм и размеров и отличающихся только положением центра. Поэтому последнюю составляющую в (5) примем равной нулю.

При раскрытии квадратичной формы в выражении (5) исключим слагаемые, не зависящие от номера класса (i, j) , и получим разделяющую функцию в линейном виде:

$$q_{ij}(\Pi) = \bar{\Pi}_i^T M^{-1} \Pi - \frac{1}{2} \bar{\Pi}_i^T M^{-1} \bar{\Pi}_j^T M^{-1} \Pi + \frac{1}{2} \bar{\Pi}_j^T M^{-1} \bar{\Pi}_j > 0. \quad (6)$$

Линейные разделяющие функции вида (6) определяют границы областей отказов в виде гиперплоскостей. В общем случае граничная гиперплоскость не ортогональна отрезку, соединяющему центры кластеров и делящему его пополам при равенстве априорных вероятностей отказов. Неравенство априорных вероятностей вызывает смещение граничной гиперплоскости в сторону кластера менее вероятного образа технических состояний ИУС на величину

$$\log(P(S_{bj})/P(S_{bi})). \quad (7)$$

Выполнение линейного преобразования компонент вектора измеряемых параметров с таким изменением масштаба и поворотом координатных осей, при котором гиперэллипсоиды кластеров принимают вид гиперсфер, позволяет рассматривать махаланобисово расстояние (4) в преобразованном пространстве как евклидово и свести ковариационную матрицу к диагональной с равными диагональными элементами. Подобный случай возникает также тогда, когда в качестве компонента вектора измеряемых параметров используются величины одинаковой физической природы.

В результате разделяющие функции принимают более простой вид:

$$q_{ij} = -(\Pi - \bar{\Pi}_i)^T (\Pi - \bar{\Pi}_j) + (\Pi - \bar{\Pi}_j)^T (\Pi - \bar{\Pi}_i) > 0. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет сформулировать правило распознавания отказов по минимуму расстояния: реализацию вектора измеряемых параметров необходимо отнести к тому образу ТС, для которого евклидово расстояние $\|\Pi - \bar{\Pi}_i\| = \sqrt{(\Pi - \bar{\Pi}_i)^T (\Pi - \bar{\Pi}_i)}$ минимально:

$$s \in S_{bi}, \text{ если } \|\Pi - \bar{\Pi}_i\| = \min_j \{\|\Pi - \bar{\Pi}_j\|\}, \quad j = 0(1)k. \quad (9)$$

При неравенстве априорных вероятностей $P(S_{bi})$ и $P(S_{bj})$ квадраты евклидовых расстояний необходимо нормировать по среднеквадратическому отклонению и смещать на величину (7), что обеспечивает при близости реализации Π к двум различным кластерам технических состояний выбор априорно более вероятного.

Для последнего случая линейные разделяющие функции принимают вид:

$$q_{ij}(\Pi) = \frac{1}{\sigma^2} \left(\bar{\Pi}_i^T \Pi - \frac{1}{2} \bar{\Pi}_i^T \bar{\Pi}_i - \bar{\Pi}_j^T \Pi + \frac{1}{2} \bar{\Pi}_j^T \bar{\Pi}_j \right) - \log(P(S_{bj})/P(S_{bi})) > 0,$$

где σ^2 — диагональные элементы ковариационной матрицы M .

Правило распознавания по минимуму расстояния обеспечивает практическую независимость положения границы областей решения от величины априорных вероятностей $P(S_{bi})$ и $P(S_{bj})$, если

$$\|\bar{\Pi}_i - \bar{\Pi}_j\| \gg \sigma^2, \quad i, j = 0, 1, \dots, k. \quad (10)$$

Поэтому для рассматриваемой задачи распознавания технических состояний нет необходимости определять априорные вероятности и элементы ковариационной матрицы σ^2 , если есть уверенность в справедливости соотношения (10). Сделанные выше и выполняющиеся в большинстве случаев на практике допущения относительно рассматриваемых внезапных отказов ИУС позволяют утверждать, что выполнения (10) можно достичь путем выбора соответствующих диагностических признаков.

Определить непредусмотренный внезапный отказ можно после проверки выдвинутой гипотезы об отказе из множества S_{bi} ($i = \bar{0}, \bar{k} - \bar{1}$) согласно решению R_{bi} , принятому в соответствии с правилом распознавания по минимуму евклидова расстояния (9). Если решение R_{bi} в результате углубленной проверки или замены отказавшего узла не подтверждено, то в СД должен быть сформирован сигнал прекращения функционирования ИУС по нештатной ситуации.

Если же принято решение об исправном состоянии системы, то необходимо перейти к проверке постепенных отказов, вызванных небольшими отклонениями параметров ИУС за допуск.

Для распознавания непредусмотренных отказов по результатам тестовых проверок без дополнительных операций необходимо области предусмотренных отказов в пространстве признаков ограничить максимальным евклидовым или махаланобисовым (при неравнозначных

и коррелированных признаках) расстоянием. В этом случае распознавание предусмотренных состояний ИУС при использовании евклидова расстояния будет выглядеть следующим образом:

$$s \in S_{bi}, \text{ если } \|\Pi - \bar{\Pi}_i\| = \min \left\{ \|\Pi - \bar{\Pi}_j\| \right\} < \|\Pi - \bar{\Pi}_i\|_{\text{доп}}, j = 0(1)k-1. \quad (11)$$

где $\|\Pi - \bar{\Pi}_i\|_{\text{доп}}$ — максимальное евклидово расстояние для i -го отказа.

Решение о непредусмотренном отказе принимается в том случае, если не будет принято решение об одном из предусмотренных отказов по правилу (11).

Решающие правила, приведенные в данном подпункте, уточняются (пересчитываются) диагностическим агентом каждый раз при поступлении новых данных об обнаруженных отказах и наборах признаков, характеризующих ТС.

Алгоритм интеллектуальной диагностики на основе ансамбля нейросетей

Для прогностического анализа применяются нейросетевые модели, обученные на временных рядах телеметрических данных. Используется ансамбль моделей типа LSTM (длинной краткосрочной памяти), каждая из которых анализирует определенный набор параметров и предсказывает вероятность возникновения отказа в ближайшем будущем.

Алгоритм включает следующие шаги:

1. Предобработка данных: нормализация, фильтрация шумов, дополнение временных рядов.

2. Использование предварительно обученных моделей LSTM:

$$P_{\text{fail},i}(t) = f_{\text{LSTM},i}(x_i(t-h), \dots, x_i(t)),$$

где $P_{\text{fail},i}(t) \in [0,1]$ — вероятность отказа параметра x_i в будущем.

3. Агрегация предсказаний в итоговую оценку системы:

$$P_{\text{fail},i}(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_{\text{fail},i}(t),$$

где α_i — веса компонентов.

4. Принятие решения о переходе в режим технического обслуживания при $P_{\text{fail},i}(t) > \tau$, где τ — установленный заранее или на основе правила (9) порог.

Такой подход позволяет выявить скрытые закономерности, недоступные для классических алгоритмов, и заранее определить риски [14].

Гибридный алгоритм с многоагентной координацией

Заключительным уровнем является гибридный алгоритм, который сочетает логический и интеллектуальный подход. Он реализуется через взаимодействие агентов:

- агенты первого уровня проводят экспресс-диагностику;
- агенты второго уровня используют предсказательные модели;
- управляющий агент агрегирует оценки и принимает решения с учетом приоритетов задач и истории поведения оборудования.

Алгоритм включает контекстную фильтрацию: незначительные отклонения игнорируются, если они типичны для текущего режима работы. Это реализуется через локальные правила принятия решений, формализованные в виде дерева решений [15].

Пример реализации и экспериментальные результаты

Для демонстрации работоспособности предложенных алгоритмов реализована экспериментальная программно-аппаратная платформа, имитирующая фрагмент вычислительной подсистемы информационно-управляющей системы подвижного состава. Основу платформы составили модули сбора данных, диагностические агенты и интерфейсы визуализации результатов диагностики.

Описание экспериментальной установки

Платформа включает в себя:

- аппаратный модуль сбора данных, эмулирующий работу датчиков телеметрии (температура, нагрузка процессора, обороты вентиляторов, параметры аккумуляторов, напряжения питания и др.);

- программный слой агентов, реализующий пороговый анализ и нейросетевую диагностику;
- LSTM-модели, обученные на архивных данных с реального транспортного оборудования (использовались открытые датасеты и лог-файлы мониторинга).

Связь между агентами осуществляется через шину с использованием протоколов JADE/FIPA. Все вычисления проводились на промышленном контроллере с ограниченными вычислительными ресурсами, что позволило оценить производительность алгоритмов в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

Ход эксперимента

В процессе тестирования моделировались различные типы неисправностей:

- перегрев компонентов (в том числе систем охлаждения);
- резкое падение производительности;
- ложные срабатывания датчиков;
- деградация параметров ИБП и аккумуляторов.

Агенты первого уровня фиксировали отклонения и формировали диагностические сигналы. Нейросетевые агенты оценивали текущее ТС и прогнозировали развитие событий с горизонтом в 1–5 минут. Управляющий агент на основании данных от нижних уровней формировал итоговые сценарии: предупреждение, переключение в резервный режим, уведомление оператора и т. д.

Анализ и результаты

Эксперимент показал следующие результаты:

- достоверность диагностики при использовании гибридного алгоритма достигла 92–95 % по сравнению с 75–80 % при использовании только порогового метода;
- среднее время обнаружения отказа сократилось с 7,3 до 2,1 с;
- обработка одного полного диагностического цикла в системе с 24 параметрами заняла менее 0,5 с на целевом оборудовании;
- уровень ложных срабатываний составил менее 2 % при правильно выбранных порогах и регуляторной переобучаемости моделей.

Таким образом, интеграция многоагентной архитектуры с нейросетевыми компонентами позволила добиться высокой точности и скорости принятия решений в задаче диагностики.

Использование в предметной области

Приведем несколько примеров использования в предметной области. Первым примером может служить диагностика и прогноз отказов системы управления тяговым приводом. В данном подходе агент сбора данных будет непрерывно получать данные о токах фаз, вибрации, температуре, агент диагностики — искать аномалии в получаемых данных, а агент принятия решений — выдавать рекомендации по полученным данным.

В качестве еще одного примера можно привести контроль системы кондиционирования и отопления салона. Тут агент мониторинга отслеживает соответствие заданной и фактической температуры. Агент-анализатор выявляет зависимости температуры от заданной, слишком высокая или низкая. Агент принятия решений сообщит ремонтной бригаде о необходимости провести диагностику системы в случаях больших отклонений.

Заключение

В статье рассмотрен подход к разработке алгоритмов диагностирования и восстановления работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава на основе многоагентной архитектуры и методов интеллектуального анализа данных. В рамках выполненного исследования основные усилия были сосредоточены на формализации математического описания работы системы, разработке гибридных диагностических алгоритмов и последующей экспериментальной проверке их работоспособности. Полученные результаты свидетельствуют, что совместное использование пороговых решающих правил и нейросетевых прогностических модулей дает ощутимый прирост как в точности, так и в оперативности обнаружения неисправностей. Мультиагентная схема организации обеспечивает модульность построения, легкость наращивания функциональности и известную устойчивость к сбоям отдельных компонентов, что

немаловажно для последующей стыковки с существующими информационно-управляющими инфраструктурами.

Данные эксперимента убедительно подтверждают состоятельность предлагаемого подхода: зафиксированы высокая достоверность диагностики, сокращение времени реакции на аномалии и возможность перехода к обслуживанию по фактиче-

скому состоянию. Разработанные решения закладывают базу для дальнейшего совершенствования интеллектуальных диагностических систем в части организации самообучающихся механизмов, гибкой настройки под нестандартные отклонения и интеграции с внешними логистическими сервисами, а также системами управления жизненным циклом оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Барановский А. М., Бобриков Д. А. Современные подходы к диагностике и восстановлению работоспособности информационно-управляющих систем подвижного состава с применением многоагентных и нейросетевых технологий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 5–13. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-5-13
2. Барановский А. М., Бобриков Д. А. Многоагентная архитектура для интеллектуальной диагностики подвижного состава: концепция и прототипирование // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 3 (43). С. 25–32. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-25-32
3. Барановский А. М., Мусиенко А. С. Динамические диагностические модели и метод обеспечения устойчивости контроля технического состояния бортовых систем управления летательных аппаратов // Труды МАИ. 2024. № 139. 31 с.
4. Звонарев С. В. Основы математического моделирования: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2019. 112 с.
5. Ромкин М. В. Идентификация объектов железнодорожного подвижного состава по их геометрическим параметрам // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO '15): труды X Международной конференции (Москва, Россия, 26–29 января 2015 г.). М.: ИПУ РАН, 2015. С. 738–750.
6. Технология Big Data: потенциал, проблемы и применение в медицине и здравоохранении / З. Т. Магеррамов [и др.] // Радиоэлектроника и информатика. 2020. № 1. С. 54–68.
7. Карнаухов Н. С., Ильяхин Р. Г. Возможности технологий «Big Data» в медицине // Врач и информационные технологии. 2019. № 1. С. 59–63.
8. Использование искусственных нейронных сетей на Российских железных дорогах для контроля токоприемников поездов / В. С. Язынин, А. М. Барановский, А. А. Воробьев, И. Ю. Романова // International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies. 2023. Т. 13, № 1. С. 267–287. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-267-287
9. Тихонов А. А. Большие данные и глубокое машинное обучение в искусственных нейронных сетях // Наука и образование сегодня. 2018. № 6 (29). С. 35–38.
10. Rithani M., Kumar R. P., Doss S. A Review on Big Data Based on Deep Neural Network Approaches // Artificial Intelligence Review. 2023. Vol. 56, iss. 12. Pp. 14765–14801. DOI: 10.1007/s10462-023-10512-5
11. Аксак Н. Г. Концепция построения мультиагентных систем распределенной нейросетевой обработки больших данных // Вестник Херсонского национального технического университета. 2018. № 3-1 (66). С. 205–212.
12. Летунова И. Э., Летунов Е. Д. Мультиагентная система для анализа больших данных на предприятиях ракетно-космической отрасли / И. Э. Летунова, Е. Д. Летунов; науч. рук. И. В. Ковалев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики (Красноярск, Россия, 11–15 апреля 2022 г.): в 3 т. Том 2. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2022. С. 45–47.

13. Липатов А. Г. Возможности использования искусственного интеллекта для управления большими информационными массивами данных Big Data // Инновации и инвестиции. 2023. № 5. С. 187–189.
14. Бова В. В., Дуккардт А. Н. Применение искусственных нейронных сетей для коллективного решения интеллектуальных задач // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. № 7. С. 131–138.
15. Никонов А. А. Гибридные подходы к адаптивному управлению организационными структурами много-агентных систем в условиях неполной наблюдаемости и динамичных изменений среды // Вестник науки. 2025. № 1-2 (82). С. 1022–1026.

Дата поступления: 02.07.2026

Решение о публикации: 27.08.2026

Formation of Separating Surfaces for Classes of Technical States in the Tasks of Training Intelligent Diagnostic Agents

Anatoly M. Baranovsky

— PhD in Engineering, Associate Professor of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: information and control systems, diagnostics and management of technical condition, neural networks. E-mail: bamvka@mail.ru

Daniil A. Bobrikov

— M. S., Postgraduate Student of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: information systems, processing of large data. E-mail: daniil20001210@mail.ru

Igor A. Molodkin

— M. S., Senior Lecturer of the “Information and Computing Systems” Department. E-mail: molodkin@pgups.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Baranovsky A. M., Bobrikov D. A., Molodkin I. A. Formation of Separating Surfaces for Classes of Technical States in the Tasks of Training Intelligent Diagnostic Agents, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 3 (47), pp. 18–34. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-18-34 (In Russian)

Abstract. *The increasing complexity of information management systems (IMS) and the volume of telemetric data require a transition from traditional centralized diagnostic schemes to intelligent distributed systems that are adaptive and scalable. One of the key tasks in developing such solutions is to formalize the processes of forming regions and separating surfaces for technical states. **Purpose:** to develop a mathematical model and algorithms for forming regions and separating surfaces for technical states during the training of a prototype intelligent system capable of self-learning and predictive assessment of the technical condition of equipment under conditions of a large flow of diagnostic data. **Methods:** an approach is proposed that combines multi-agent organization of components, implementation of distributed streaming data processing using neural network and threshold methods, as well as the use of Big Data infrastructure for data storage, aggregation, and analysis. The diagnostic task has been formalized; algorithms for forming regions and separating surfaces of technical states, for predicting and assessing the probability of failure have been developed; a prototype has been implemented on a computing platform. **Results:** an architecture of an intelligent IMS has been developed, which includes agents for data collection, preprocessing, and analysis, a prediction module based on LSTM, a decision-making agent, and interfaces for interaction with the operator. Calculations are presented that demonstrate an increase in diagnostic reliability with an increase in data volume. Real-time telemetry processing scenarios have been*

implemented. **Practical significance:** the results obtained during the experiment indicate the effectiveness of the proposed approach. The possibilities for scaling the system and integrating it into the existing transport infrastructure are described, ensuring fault tolerance and autonomy.

Keywords: multi-agent systems, neural network technologies, information management systems, transport, automation

REFERENCES

1. Baranovsky A. M., Bobrikov D. A. Sovremennye podkhody k diagnostike i vosstanovleniyu rabotosposobnosti informatsionno-upravlyayushchikh sistem podvizhnogo sostava s primeneniem mnogoagentnykh i neyrosetevykh tekhnologiy [Modern Approaches to Diagnostics and Recovery of Rolling Stock Information Management Systems Using Multi-Agent and Neural Network Technologies], *Intellektualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport]*, 2025, no. 1 (41), pp. 5–13. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-141-5-13 (In Russian)
2. Baranovsky A. M., Bobrikov D. A. Mnogoagentnaya arkhitektura dlya intellektualnoy diagnostiki podvizhnogo sostava: kontseptsiya i prototipirovanie [Multi-Agent Architecture for Intelligent Rolling Stock Diagnostics: Concept and Prototyping], *Intellektualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport]*, 2025, no. 3 (43), pp. 25–32. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-25-32 (In Russian)
3. Baranovsky A. M., Musienko A. S. Dinamicheskie diagnosticheskie modeli i metod obespecheniya ustoychivosti kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya bortovykh sistem upravleniya letatelnykh apparatov [Dynamic Diagnostic Models and Method for Ensuring the Stability of Monitoring the Technical Condition of On-Board Control Systems of Aircraft], *Trudy MAI*, 2024, no. 139, 31 p. (In Russian)
4. Zvonarev S. V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya: uchebnoe posobie [Fundamentals of Mathematical Modeling: A Textbook]. Yekaterinburg, Ural Federal University Publishing House, 2019, 112 p. (In Russian)
5. Romkin M. V. Identifikatsiya obektov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava po ikh geometricheskim parametram [Identification of Objects of the Railway Vehicles Via Their Geometric Parameters], *Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya (SICPRO '15): trudy X Mezhdunarodnoy konferentsii [System Identification and Control Problems (SICPRO '15): Proceedings of the X International Conference]*, Moscow, Russia, January 26–29, 2015. Moscow, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, 2015, pp. 738–750. (In Russian)
6. Maharramov Z. T., et al. Tekhnologiya Big Data: potentsial, problemy i primenenie v meditsine i zdravookhraneni [Big Data Technology: Potential, Challenges and Applications in Medicine and Healthcare], *Radioelektronika i informatika*, 2020, no. 1, pp. 54–68. (In Russian)
7. Karnaukhov N. S., Ilyukhin R. G. Vozmozhnosti tekhnologiy “Big Data” v meditsine [Capabilities of “Big Data” Technologies in Medicine], *Vrach i informatsionnye tekhnologii [Medical Doctor and Information Technologies]*, 2019, no. 1, pp. 59–63. (In Russian)
8. Yazinin V. S., Baranovskiy A. M., Vorobyev A. A., Romanova I. Yu. Ispolzovanie iskusstvennykh neyronnykh setey na Rossiyskikh zheleznnykh dorogakh dlya kontrolya tokopriemnikov poezdov [The Use of Artificial Neural Networks on Russian Railways to Control Current Collectors of Trains], *International Journal of Advanced Studies: Transport and Information Technologies*, 2023, Vol. 13, no. 1, pp. 267–287. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-267-287 (In Russian)
9. Tikhonov A. A. Bolshie dannye i glubokoe mashinnoe obuchenie v iskusstvennykh neyronnykh setyakh [Big Data and Deep Machine Learning in Artificial Neural Networks], *Nauka i obrazovanie segodnya*, 2018, no. 6 (29), pp. 35–38. (In Russian)
10. Rithani M., Kumar R. P., Doss S. A Review on Big Data Based on Deep Neural Network Approaches, *Artificial Intelligence Review*, 2023, vol. 56, iss. 12, pp. 14765–14801. DOI: 10.1007/s10462-023-10512-5
11. Axak N. G. Kontseptsiya postroeniya multiagentnykh sistem raspredelennoy neyrosetevoy obrabotki bolshikh dannykh [Concept of Construction of Multiagent Systems of Distributed Neural Network Processing of Big Data], *Vestnik*

Khersonskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta [Visnyk of Kherson National Technical University], 2018, no. 3-1 (66), pp. 205–212. (In Russian)

12. Letunova I. E., Letunov E. D. Multiagentnaya sistema dlya analiza bolshikh dannykh na predpriyatiyakh raketno-kosmicheskoy otrasli [Multi-Agent System for Analysis of Big Data at an Enterprise of the Rocket and Space Industry], *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference*, Krasnoyarsk, Russia, April 11–15, 2022. Vol. 2. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 2022, pp. 45–47. (In Russian)

13. Lipatov A. G. Vozmozhnosti ispolzovaniya iskusstvennogo intellekta dlya upravleniya bolshimi informatsionnymi massivami dannykh Big Data [Possibilities of Using Artificial Intelligence to Manage Large Information Arrays of Big Data], *Innovatsii i investitsii [Innovation and Investment]*, 2023, no. 5, pp. 187–189. (In Russian)

14. Bova V. V., Duckardt A. N. Primenenie iskusstvennykh neyronnykh setey dlya kollektivnogo resheniya intellektualnykh zadach [Application of Artificial Neural Networks for Collective Decision of Complex Intelligent Problems], *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya Southern Federal University. Engineering Sciences]*, 2012, no. 7, pp. 131–138. (In Russian)

15. Nikonov A. A. Gibridnye podkhody k adaptivnomu upravleniyu organizatsionnymi strukturami mnogoagentnykh sistem v usloviyakh nepolnoy nablyudaemosti i dinamichnykh izmeneniy sredy [Hybrid Approaches to Adaptive Management of Organizational Structures of Multi-Agent Systems Under Conditions of Incomplete Observability and Dynamic Changes in Environment], *Vestnik Nauki*, 2025, no. 1-2 (82), pp. 1022–1026. (In Russian)

Received: July 02, 2026

Accepted: August 27, 2026

УДК 625.1:681.5

Алгоритмы функционирования датчика осадков, интерфейс взаимодействия с системой обогрева и программная реализация

Бараусов Виктор Александрович¹

— руководитель проекта. Научные интересы: интеллектуальные противообледенительные системы, математические модели, интеллектуальные системы управления.
E-mail: barausovv@gmail.com

Бубнов Владимир Петрович²

— доктор техн. наук, профессор. Научные интересы: математические модели, интеллектуальные противообледенительные системы. E-mail: bubnov1950@yandex.ru

Забузов Вячеслав Сергеевич³

— кандидат техн. наук, доцент кафедры информационно-вычислительных систем и сетей. Научные интересы: повышение производительности микропроцессорных систем.
E-mail: zzvvs80@mail.ru

Моисеев Владимир Иванович²

— доктор техн. наук, доцент. Профессор кафедры «Высшая математика». Научные интересы: интеллектуальные системы обогрева и теплоснабжения, математическое моделирование, методы оптимизации. E-mail: moiseev_v_i@list.ru

¹ Группа компаний «ИМСАТ», Россия, 190031, Санкт-Петербург, ул. Гражданская, д. 7, лит. А

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

³ Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Для цитирования: Алгоритмы функционирования датчика осадков, интерфейс взаимодействия с системой обогрева и программная реализация / В. А. Бараусов, В. П. Бубнов, В. С. Забузов, В. И. Моисеев // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 3 (47). С. 35–43. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-35-43

Аннотация. Рассматриваются алгоритмы функционирования датчика осадков, предназначенного для обнаружения снега и льда на элементах железнодорожной инфраструктуры. **Цель:** разработка, описание и программная реализация алгоритмов функционирования датчика осадков для автоматических систем обогрева стрелочных переводов. **Методы:** построены на дифференциальном анализе температурных сигналов двух чувствительных элементов с использованием плавающего окна фильтрации. **Результаты:** разработан интеллектуальный алгоритм обнаружения осадков с динамической конфигурацией параметров. Описаны принципы формирования управляющих сигналов, взаимодействие с системой автоматического обогрева стрелочных переводов, а также программная реализация алгоритмов на базе микроконтроллеров с использованием SD-карты и часов реального времени. **Практическая значимость:** заключается в реализации технического решения на объектах инфраструктуры, что позволит снизить энергопотребление систем обогрева за счет минимизации ложных срабатываний.

Ключевые слова: датчик осадков, обогрев стрелочных переводов, микроконтроллер, алгоритм, фильтрация, железнодорожная автоматика

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

Введение

Обеспечение надежной работы железнодорожной инфраструктуры в зимний период требует своевременного обнаружения и устранения осадков в виде снега и наледи. Одним из ключевых элементов системы противообледенительной защиты является датчик осадков, способный точно определить наличие снежного или ледяного покрова и передать соответствующий сигнал в систему управления обогревом стрелочного перевода.

Исследование направлено на повышение надежности железнодорожной инфраструктуры в зимних условиях за счет интеллектуального управления обогревом стрелочных переводов на основе точного и адаптивного датчика осадков. Цель исследования заключается в создании универсального алгоритма, который способен дифференцированно распознавать наличие снега и льда, адаптироваться к изменениям внешней среды и управлять исполнительными механизмами в реальном времени.

Постановка задачи

Задачей исследования является разработка интеллектуального алгоритма обнаружения осадков для систем автоматического обогрева стрелочных переводов, обеспечивающего повышение надежности железнодорожной инфраструктуры в зимний период эксплуатации. Для этого необходимо:

1. Разработать дифференциальный метод анализа температурных сигналов на основе двух синхронно работающих чувствительных элементов с временным сдвигом нагрева, позволяющий выделять полезный сигнал на фоне внешних температурных шумов.
2. Создать адаптивный алгоритм фильтрации данных с использованием скользящего окна измерений, обеспечивающий устойчивость показаний к кратковременным помехам и плавное отслеживание изменений метеорологических условий.
3. Обосновать комбинированный критерий принятия решения о наличии осадков, учитывающий как абсолютные значения температур, так и динамику их изменения во времени.
4. Реализовать механизм динамической конфигурации параметров алгоритма через внеш-

нюю SD-карту без необходимости перепрошивки микроконтроллера.

5. Разработать систему документирования рабочих параметров с временной привязкой для последующего анализа и диагностики работы датчика.

6. Спроектировать универсальные интерфейсы взаимодействия с системами управления обогревом на основе стандартных промышленных протоколов связи.

Решение указанных задач позволит создать энергоэффективную систему обнаружения осадков, способную минимизировать ложные срабатывания и оптимизировать энергопотребление систем обогрева стрелочных переводов.

Конструкция и принцип действия датчика осадков

Датчик состоит из двух чувствительных элементов (ЧЭ1 и ЧЭ2), конструктивно идентичных и теплоизолированных друг от друга [1, 2]. Каждый элемент включает теплопроводную пластину, встроенный температурный датчик и нагревательный элемент. Оба ЧЭ расположены горизонтально и подвержены одинаковому атмосферному воздействию. Отличие заключается в том, что нагреватель второго ЧЭ включается с временной задержкой Δt .

Алгоритм функционирования датчика осадков

Работа датчика включает в себя следующие этапы:

1. Предварительные действия.
2. Начало.
3. Измерения.
4. Нагрев.
5. Анализ/Решение. На основе полученных температур вычисляется скользящее среднее разности температур (ΔT_{avg}) с использованием адаптивного алгоритма фильтрации. Это значение сравнивается с пороговыми значениями (TRESHOLD_1, TRESHOLD_2). Логический блок на основе комбинированного критерия принимает решение о наличии осадков.
6. Сброс/Цикл.

Графическая блок-схема, отражающая последовательность этапов работы алгоритма, приведена на рисунке.

Способы передачи информации

Выходной сигнал от датчика может быть передан в систему автоматического обогрева стрелочного перевода следующими способами:

- по проводной связи через цифровой канал (UART, RS-485);
- с использованием радиоканала при отсутствии кабельной инфраструктуры;
- посредством протокола Modbus для взаимодействия с промышленными контроллерами [3];
- через лог-файл с периодической выгрузкой по сети или по команде оператора.

Программная реализация

Для реализации алгоритмов использован микроконтроллер Arduino MEGA 2560 [4] с внешними модулями, что соответствует современным подходам к построению систем мониторинга инженерной инфраструктуры [3]:

- часами реального времени (DS1307 [5]) для метки времени измерений;
- картой MicroSD для хранения параметров конфигурации и журнала логов;
- аналоговыми входами АЦП для считывания температуры;
- цифровыми выходами для управления нагревателями.

Программа реализует непрерывный цикл измерений с частотой 10 Гц. В начале выполнения

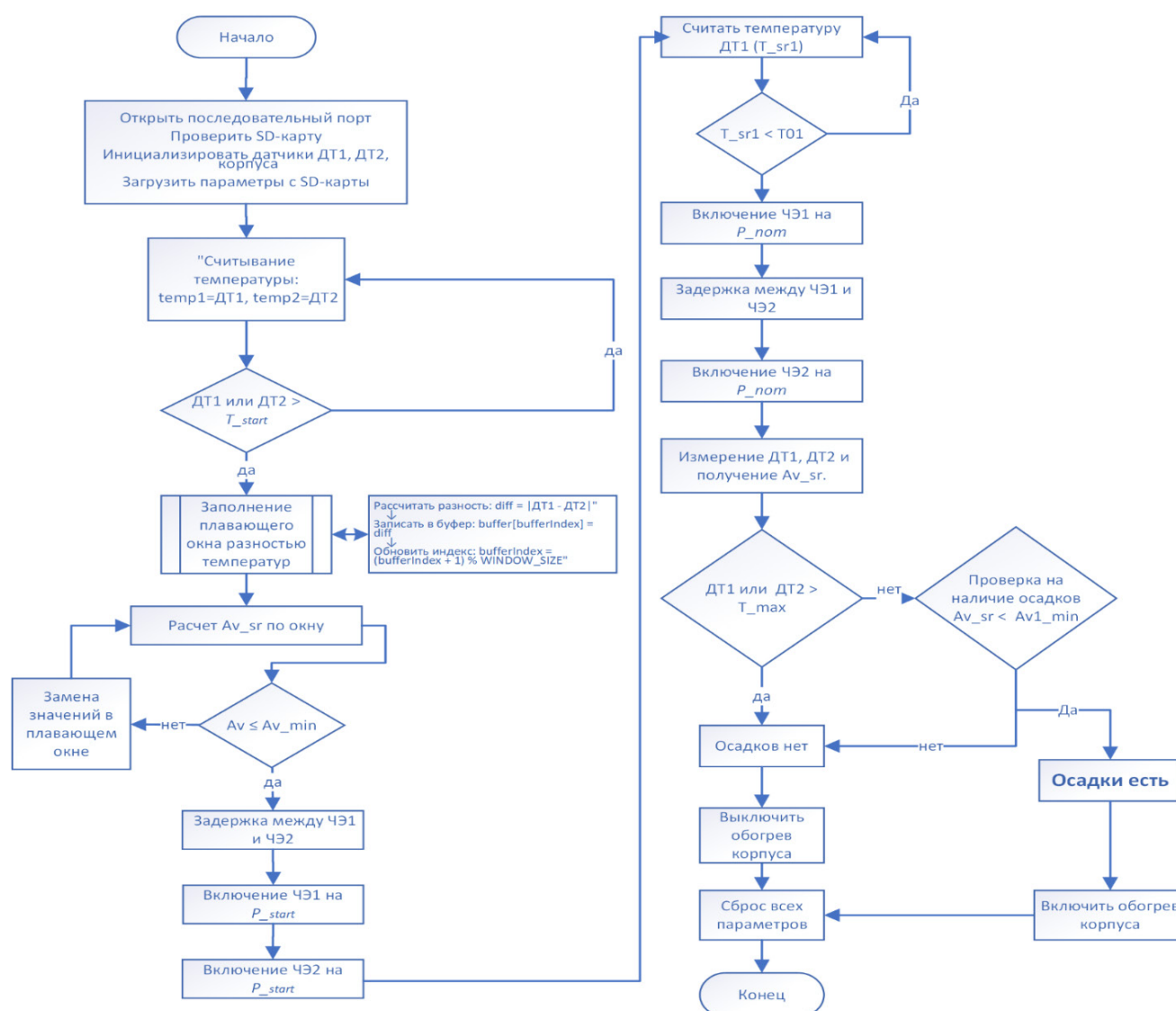


Рисунок. Графическая блок-схема работы алгоритма

осуществляется инициализация всех подключенных модулей. Инициализация SD-карты производится с помощью библиотеки SD:

```
#include <SD.h>
File logFile;
void initSDCard() {
    if (! SD.begin(SD_CS_PIN)) {
        Serial.println(«Ошибка инициализации
        SD-карты!»);
        while (1); // Остановка при ошибке
    }
    Serial.println(«SD-карта инициализиро-
    вана.»);
}
```

Инициализация часов реального времени (RTC) DS1307 выполняется с использованием библиотеки RTCLib [5]:

```
#include <RTCLib.h>
RTC_DS1307 rtc;
void initRTC() {
    if (!rtc.begin()) {
        Serial.println(«Не удалось найти мо-
        дуль RTC»);
        while (1);
    }
    if (!rtc.isrunning()) {
        Serial.println(«RTC не запущен,
        установка текущего времени»);
        rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__),
        F(__TIME__)));
    }
}
```

Конфигурационные параметры считываются из файла config.txt, расположенного на SD-карте. Пример реализации чтения конфигурационного файла:

```
#define MAX_WINDOW_SIZE 100
int windowSize = 10
void loadConfig() {
    File configFile = SD.open("config.txt");
    if (configFile) {
        while (configFile.available()) {
            String line = configFile.
            readStringUntil('\n');
            if (line.startsWith("TRESHOLD_1="))
            {
```

```
TRESHOLD_1 = line.substring(11).
toFloat();
        } else if (line.
        startsWith("TRESHOLD_2=")) {
            TRESHOLD_2 = line.substring(11).
            toFloat();
        } else if (line.startsWith("WINDOW_
        SIZE=")) {
            windowSize = line.substring(12).
            toInt();
        }
        // Можно добавить другие параметры
    }
    configFile.close();
} else {
    Serial.println("Не удалось открыть
    config.txt");
}
}
```

Этот подход позволяет изменять поведение алгоритма без перекомпиляции прошивки, что удобно для отладки и эксплуатации [6]. Пример файла config.txt:

```
TRESHOLD_1=0.7
TRESHOLD_2=1.5
WINDOW_SIZE=10
DELAY_MS=3000
T_SHELL_MAX=40.0
```

Каждый параметр задается в формате «ключ — значение». Параметры могут быть расширены в зависимости от требований системы. Алгоритм управления нагревателями и анализа данных строго соответствует изложенному в технической документации.

Структура основной части программы на языке C++:

```
void loop() {
    float temp1 = readTemperature(TEMP1_
    PIN);
    float temp2 = readTemperature(TEMP2_
    PIN);
    float tempShell = readTemperature(TEMP_
    SHELL_PIN);
    updateBuffers(temp1, temp2);
    bool osadki = false;
```

```

if ((temp1 > TRESHOLD_2 || temp2 >
TRESHOLD_2) && diff_avg < TRESHOLD_1) {
    osadki = true;
}
if (osadki) {
    digitalWrite(HEATER1_PIN, HIGH);
    delay(DELAY_MS);
    digitalWrite(HEATER2_PIN, HIGH);
} else {
    digitalWrite(HEATER1_PIN, LOW);
    digitalWrite(HEATER2_PIN, LOW);
}
if (tempShell > T_SHELL_MAX) {
    digitalWrite(HEATER_SHELL_PIN, LOW);
} else {
    digitalWrite(HEATER_SHELL_PIN,
HIGH);
}
logData(temp1, temp2, tempShell,
osadki);
delay(100);
}

```

Функция `readTemperature()` считывает значение АЦП и переводит его в температуру. Пример реализации:

```

float readTemperature(uint8_t pin) {
    int raw = analogRead(pin);
    float voltage = raw * (5.0 / 1023.0);
    // пересчет в напряжение
    float temperature = (voltage - 0.5) *
100.0; // преобразование в °C
    return temperature;
}

```

Функция `updateBuffers()` реализует скользящее окно и вычисление средней разности температур между ЧЭ1 и ЧЭ2. Она обновляет массивы последних N измерений и пересчитывает `diff_avg`. Пример реализации:

```

float buffer1[MAX_WINDOW_SIZE];
float buffer2[MAX_WINDOW_SIZE];
int bufferIndex = 0;
void updateBuffers(float t1, float t2) {
    buffer1[bufferIndex] = t1;
    buffer2[bufferIndex] = t2;
}

```

```

bufferIndex = (bufferIndex + 1)%
windowSize;
float sum = 0;
for (int i = 0; i < windowSize; i++) {
    sum += abs(buffer1[i] - buffer2[i]);
}
diff_avg = sum / windowSize;
}

```

Функция `logData()` сохраняет измеренные данные и результат диагностики осадков на SD-карту в формате CSV:

```

void logData(float t1, float t2, float
tShell, bool osadki) {
    DateTime now = rtc.now();
    logFile = SD.open("log.csv", FILE_
WRITE);
    if (logFile) {
        logFile.print(now.timestamp());
        logFile.print(",");
        logFile.print(t1);
        logFile.print(",");
        logFile.print(t2);
        logFile.print(",");
        logFile.print(tShell);
        logFile.print(",");
        logFile.println(osadki? «1»: «0»);
        logFile.close();
    }
}

```

Файл `log.csv` содержит следующие поля:

- временная метка (дата и время);
- температура чувствительного элемента 1 (ЧЭ1);
- температура чувствительного элемента 2 (ЧЭ2);
- температура корпуса;
- признак наличия осадков (1 — да, 0 — нет).

Пример содержимого файла `log.csv`:

```

2025-07-09T10:00:00,1.25,1.10,3.55,1
2025-07-09T10:00:01,1.22,1.05,3.50,1
2025-07-09T10:00:02,1.18,1.03,3.48,0

```

Структура файловой системы SD-карты:

/SD-карта

└─ config.txt ← Конфигурационный файл
(пороговые значения, параметры окна, за-
держки)

```
└─ log.csv ← Журнал измерений и событий
(CSV-формат)
└─ backup/ ← (опционально) Архивные
логи по дням
```

```
└─ log_2025_07_08.csv
└─ log_2025_07_07.csv
└─ ...
```

Такая структура позволяет удобно управлять настройками и архивировать данные при длительной эксплуатации системы [6]. Конфигурация читается при старте, а логи могут копироваться вручную или автоматически при подключении к компьютеру. Результат диагностики осадков записывается на SD-карту в формате CSV:

```
void logData(float t1, float t2, float
tShell, bool osadki) {
    DateTime now = rtc.now();
    logFile = SD.open("log.csv", FILE_
WRITE);
    if (logFile) {
        logFile.print(now.timestamp());
        logFile.print(",");
        logFile.print(t1);
        logFile.print(",");
        logFile.print(t2);
        logFile.print(",");
        logFile.print(tShell);
        logFile.print(",");
        logFile.println(osadki? «1»: «0»);
        logFile.close();
    }
}
```

Этот журнал используется для диагностики и анализа условий, при которых фиксировались осадки.

Интерфейс взаимодействия с системой обогрева

Для эффективной интеграции датчика осадков в систему автоматического обогрева стрелочных переводов разработан универсальный интерфейс взаимодействия. Он обеспечивает передачу диагностической информации, управляющих сигналов и контрольных параметров между микроконтроллером датчика и контроллером обогрева. Возможны следующие уровни реализации [7, 8]:

1. Физический уровень.

- проводное подключение (двухпроводной RS-485 или однопроводной UART);
- беспроводное подключение по радиоканалу (например, на базе модуля LoRa или ZigBee).

2. Протокольный уровень.

- протокол Modbus RTU (в режиме slave) — микроконтроллер датчика предоставляет регистры с текущими значениями температур, признаками осадков и системным статусом [3, 8];

- упрощенный протокол передачи по UART: строка формата YYMMDD, HHMMSS, T1, T2, TS, OS (время, температуры, признак осадков).

Информационные параметры, передаваемые в систему управления:

- T1 — температура ЧЭ1;
- T2 — температура ЧЭ2;
- TSHELL — температура корпуса;
- OSADKI — флаг наличия осадков (bool);
- ERROR_FLAG — флаг неисправности.

Функциональные команды, получаемые от контроллера:

- SET_CONFIG — команда на перезагрузку параметров конфигурации;
- FORCE_HEAT_ON/FORCE_HEAT_OFF — принудительное управление обогревом;
- REQUEST_LOG — передача фрагмента лога.

Пример команды обмена (UART):

- от датчика: 240709_103000,1.25,1.10,3.55,1;
- от контроллера: SET_CONFIG.

Интерфейс может быть реализован как в виде прямой передачи по последовательному порту, так и в составе SCADA-систем, объединяющих множество датчиков в централизованной системе мониторинга.

Эффективный метод дифференциального анализа с плавающим окном фильтрации

Предложенный метод анализа температурных сигналов основывается на дифференциальной обработке данных с двух чувствительных элементов, один из которых включается с задержкой. Это позволяет оценить влияние осадков на теплопередачу.

Суть метода заключается в следующем:

1. Температуры двух элементов (T_1 и T_2) изменяются синхронно, но один элемент (ЧЭ2) нагревается с временной задержкой Δt по сравнению с другим (ЧЭ1).

2. Разность температур $\Delta T_i = |T_{1,i} - T_{2,i}|$ анализируется во времени.

3. Используется плавающее окно фильтрации: последние N значений ΔT_i сохраняются в буфере.

4. Вычисляется скользящее среднее разностей температур — это и есть основной диагностический параметр [2]:

$$\Delta T_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |T_{1,i} - T_{2,i}|.$$

5. При наличии осадков теплопередача между ЧЭ и окружающей средой изменяется (особенно для снега и льда), и это отражается в меньшей температурной разнице между ЧЭ1 и ЧЭ2.

Преимущества метода:

- устойчивость к шуму и кратковременным помехам за счет усреднения;
- возможность адаптации под разные климатические условия за счет настройки параметров окна и порогов;

- легкость реализации на микроконтроллерах с малым объемом памяти.

Таким образом, метод позволяет надежно фиксировать наличие осадков, повышая точность системы управления обогревом стрелок в реальных эксплуатационных условиях [9].

Заключение

Предложенное решение обладает научной новизной, заключающейся в использовании комбинированного критерия на основе дифференциального анализа температур чувствительных элементов, а также в реализации адаптивного алгоритма с возможностью конфигурации параметров без перепрошивки устройства. Практическая значимость заключается в интеграции предложенного метода в системы автоматического управления стрелочным обогревом, обеспечивая снижение энергопотребления, повышение надежности и сокращение эксплуатационных расходов. Разработанная программная архитектура может быть адаптирована под различные аппаратные платформы и расширена с учетом дополнительных факторов окружающей среды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Способ и устройство обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности: патент № 2685631 Российская Федерация, МПК E01B 7/00 (2006.01), E01B 19/00 (2006.01), E01H 8/08 (2006.01), B64D 15/20 (2006.01). № 2018125617 / Селянин С. Г.; заявители Бараусов В. А., Григорьев П. В.; заявл. 11.07.2018; опубл. 22.04.2019. 20 с.
2. Способ и устройство определения толщины льда на рабочей поверхности датчика обледенения: патент № 2763473 Российская Федерация, МПК B64D 15/20 (2006.01), E01B 7/24 (2006.01), E01B 19/00 (2006.01), E01H 8/08 (2006.01). № 2021115157 / Бараусов В. А., Григорьев П. В., Семенов А. Г.; заявители Бараусов В. А., Григорьев П. В.; заявл. 26.05.2021; опубл. 29.12.2021. 21 с.
3. Аналитический обзор современных микроконтроллеров в системах управления / К. Д. Черепанов [и др.] // Международный студенческий научный вестник. 2022. № 6. 5 с. DOI: 10.17513/msnv.21077
4. SD Library — Arduino Documentation. URL: <http://www.arduino.cc/en/Reference/SD> (дата обращения: 05.05.2026).
5. Adafruit RTCLib. URL: <http://github.com/adafruit/RTCLib> (дата обращения: 05.05.2026).
6. Алгоритмы фильтрации шумов в цифровых сигналах / О.Л. Балышева [и др.] // Флагман науки. 2025. № 1 (24). С. 304–308.
7. Бубнов В. П., Бараусов В. А., Султонов Ш. Х. Анализ датчиков автоматической системы обогрева стрелочных переводов // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 4. С. 8–11. DOI: 10.34649/AT.2022.4.4.002
8. ГОСТ Р 59263-2020. Системы и устройства железнодорожной автоматики и телемеханики микропроцессорные. Требования к интерфейсам и протоколам обмена информацией = Microprocessor systems and devices of railway

automatics and telematics. Requirements for interfaces and information exchange protocols: национальный стандарт Российской Федерации: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2020 г. № 1317-ст: дата введения: 2021-06-01. М.: Стандартинформ, 2020. 15 с.

9. Испытательный стенд, результаты проведения испытаний датчика обледенения / В. П. Бубнов, В. А. Бараусов, В. С. Забузов, Ш. Х. Султонов // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8, № 3. С. 276–286. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-03-276-286

Дата поступления: 22.05.2026

Решение о публикации: 27.08.2026

Algorithms for Precipitation Sensor Operation, Interface for Interaction with the Heating System, and Software Implementation

- Viktor A. Barausov**¹ — Project Manager. Research interests: intelligent anti-icing systems, mathematical modeling, intelligent control systems. E-mail: barausovv@gmail.com
- Vladimir P. Bubnov**² — Dr. Sci. in Engineering, Full Professor. Research interests: mathematical models, intelligent anti-icing systems. E-mail: bubnov1950@yandex.ru
- Vyacheslav S. Zabuzov**³ — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Information and Computing Systems and Networks. Research interests: improving the performance of microprocessor systems. E-mail: zzvss80@mail.ru
- Vladimir I. Moiseev**² — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor. Professor of the “Higher Mathematics” Department. Research interests: intelligent heating and heat supply systems, mathematical modeling, optimization methods. E-mail: moiseev_v_i@list.ru

¹ IMSAT Group LLC, 7 Grazhdanskaya str., Saint Petersburg, 190031, Russia

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

³ Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13 Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia

For citation: Barausov V. A., Bubnov V. P., Zabuzov V. S., Moiseev V. I. Algorithms for Precipitation Sensor Operation, Interface for Interaction with the Heating System, and Software Implementation, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 3 (47), pp. 35–43. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-35-43 (In Russian)

Abstract. *The paper considers operating algorithms for a precipitation sensor designed to detect snow and ice on railway infrastructure elements. **Purpose:** to develop, describe and implement in software the operating algorithms of a precipitation sensor for automatic heating systems of railway turnouts. **Methods:** the algorithms are based on differential analysis of temperature signals from two sensing elements using a sliding filtering window. **Results:** an intelligent precipitation detection algorithm with dynamic parameter configuration has been developed. The principles of generating control signals, interaction with the automatic heating system for railway turnouts, and software implementation of the algorithms on microcontroller-based hardware using an SD card and a real-time clock are described. **Practical significance:** the proposed technical solution can be implemented at infrastructure facilities and will make it possible to reduce the energy consumption of heating systems by minimizing false alarms.*

Keywords: precipitation sensor; turnout heating; microcontroller; algorithm; filtering; railway automation

REFERENCES

1. Selyanin S. G. Patent RU 2685631 C1. Sposob i ustroystvo obnaruzheniya obledeneniya ili snega na kontroliruemoy poverkhnosti [Method and Device of Detecting Icing or Snow on a Controlled Surface], patent RU No. 2685631, published at April 22, 2019, 20 p. (In Russian)
2. Barausov V. A., Grigorev P. V., Semenov A. G. Sposob i ustroystvo opredeleniya tolshchiny lda na rabochey poverkhnosti datchika obledeneniya [Method and Device for Determining Ice Thickness on the Working Surface of Ice-Formation Sensor], patent RU No. 2763473, published at December 29, 2021, 21 p. (In Russian)
3. Cherepanov K. D., et al. Analiticheskiy obzor sovremennykh mikrokontrollerov v sistemakh upravleniya [Analytical Review of Modern Microcontrollers in Control Systems], *Mezhdunarodnyy Studencheskiy Nauchnyy Vestnik*, 2022, no. 6, 5 p. DOI: 10.17513/msnv.21077 (In Russian)
4. SD Library — Arduino Documentation. Available at: <http://www.arduino.cc/en/Reference/SD> (accessed: May 05, 2026).
5. Adafruit RTCLib. Available at: <http://github.com/adafruit/RTCLib> (accessed: May 05, 2026).
6. Balysheva O. L., et al. Algoritmy filtratsii shumov v tsifrovyykh signalakh [Algorithms Filtering for Noise in Digital Signals], *Flagman Nauki*, 2025, no. 1 (24), pp. 304–308.
7. Bubnov V. P., Barausov V. A., Sultonov Sh. Kh. Analiz datchikov avtomaticheskoy sistemy obogreva strelochnykh perevodov [Analysis of Sensors of Automatic Heating System of Switches], *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, Communication, Informatics]*, 2022, no. 4, pp. 8–11. DOI: 10.34649/AT.2022.4.4.002 (In Russian)
8. GOST R 59263-2020. Sistemy i ustroystva zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki mikroprotsessornye. Trebovaniya k interfeysam i protokolam obmena informatsiy [GOST R 59263-2020. Microprocessor systems and devices of railway automatics and telemechanics. Requirements for interfaces and information exchange protocols]. Effective from June 01, 2021. Moscow, Standartinform Publishing House, 2020, 15 p. (In Russian)
9. Bubnov V. P., Barausov V. A., Zabuzov V. S., Sultonov Sh. Kh. Ispytatelnyy stand, rezultaty provedeniya ispytaniy datchika obledeneniya [Test Bench, Ice Sensor Test Results], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 276–286. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-03-276-286 (In Russian)

Received: May 22, 2026

Accepted: August 27, 2026

УДК 004.65

Сравнительный анализ реализации модели «ключ — значение» в PostgreSQL и Redis: оценка задержек и пропускной способности

**Волошин Ратмир
Анатольевич**

— студент бакалавриата 3-го курса направления 38.03.05 «Бизнес-информатика». Научные интересы: информационные системы, разработка и исследование характеристик приложений для работы с базами данных. E-mail: vratmir@yandex.ru

**Хомоненко Анатолий
Дмитриевич**

— доктор техн. наук, профессор. Профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, вероятностное моделирование геоинформационных систем, генетические алгоритмы, информационная безопасность. E-mail: khomon@mail.ru

**Юдников Степан
Сергеевич**

— магистр, аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, разработка и исследование характеристик приложений для работы с базами данных. E-mail: s.yudnikovv@gmail.com

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Волошин Р. А., Хомоненко А. Д., Юдников С. С. Сравнительный анализ реализации модели «ключ — значение» в PostgreSQL и Redis: оценка задержек и пропускной способности // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 3 (47). С. 44–55. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-44-55

Аннотация. *Предлагается экспериментально обоснованный подход к сравнению производительности реализации модели «ключ — значение» в PostgreSQL и Redis. Цель: оценка задержек и пропускной способности операций чтения и записи при различной степени параллельной нагрузки. Методы: анализ архитектур PostgreSQL (MVCC, WAL, индексы B-tree, GIN, типы jsonb и hstore) и Redis (in-memory-хранение, строки и хэши, TTL, pipelining); создание экспериментального стенда; генерация тестовой таблицы объемом 1 000 000 записей; нагрузочное тестирование с использованием rpgbench и redis-benchmark при параллельности от 1 до 128 клиентов; измерение пропускной способности, средней и хвостовой задержек (p95, p99). Результаты: Redis обеспечивает в 5–10 раз меньшую задержку чтения и в 3–5 раз более высокую пропускную способность по сравнению с PostgreSQL для точечных операций GET/SET; использование pipelining позволяет дополнительно повысить пропускную способность в 2–3 раза; PostgreSQL сохраняет преимущество в универсальности, поддерживая транзакции, сложные выборки и долговременное хранение. Практическая значимость: разработанная методика тестирования и полученные количественные оценки применимы при выборе архитектуры хранения для высоконагруженных информационных систем, включая системы мониторинга и трекинга на транспорте.*

Ключевые слова: PostgreSQL, Redis, модель «ключ — значение», задержка, пропускная способность, высоконагруженные транзакции, jsonb, hstore, in-memory-хранилище

2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

Введение

Скорость доступа к данным напрямую влияет на работу современных информационных систем. Интернет-магазин проверяет корзину и остатки, банковский сервис читает параметры операции, система авторизации обращается к токенам, а игровой сервер постоянно обновляет счетчики. Во всех этих случаях снова и снова выполняются простые действия вроде «получить значение по ключу», «изменить значение» или «увеличить счетчик» [1]. Именно такая нагрузка характерна для модели «ключ — значение» (Key-Value, KV).

Сама модель устроена просто, но итоговая производительность сильно зависит от того, в какой СУБД она реализована. В PostgreSQL ключ и значение обычно размещаются в строке таблицы. Ключ индексируется, значение можно хранить в text, jsonb или hstore, а доступ выполняется через SQL-запросы [2]. Вместе с тем PostgreSQL обеспечивает транзакции, контроль целостности и долговременное хранение. За эти возможности приходится платить дополнительной работой WAL, MVCC и индексов [3].

Redis изначально создавался как хранилище структур данных в оперативной памяти [4]. Для GET, SET, HGET и HSET путь обработки короче, поскольку нужные структуры уже находятся в памяти, а команды передаются компактным протоколом [5]. Это дает низкую задержку. Но у такого подхода есть своя цена: нужно учитывать объем оперативной памяти, режим персистентности и сетевой RTT.

Цель исследования состоит в сравнении реализации KV-модели в PostgreSQL и Redis. Основное внимание уделяется скорости чтения и записи при росте параллельной нагрузки, после чего на основе измерений формируются рекомендации по выбору архитектуры хранения.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Сравнение вариантов хранения KV-данных в PostgreSQL с типами text, jsonb и hstore и в Redis с типами String и Hash.

2. Построение единой методики, по которой можно сопоставить чтение и запись в обеих системах.

3. Подготовка скриптов, позволяющих воспроизводить одинаковую нагрузку.

4. Обработка полученных результатов и подготовка практических рекомендаций.

Теоретические основы модели

«ключ — значение»

Сущность модели и виды операций

В модели «ключ — значение» каждая запись определяется уникальным ключом, которому соответствует некоторое значение [6]. В роли значения могут выступать обычная строка, число, бинарный объект, JSON-документ или сериализованная структура приложения. Поэтому одна и та же схема подходит и для простого счетчика, и для более сложного пользовательского объекта.

Набор операций у KV-модели обычно невелик. Значение записывают через SET, читают через GET, обновляют или удаляют с помощью DEL. EXISTS проверяет наличие ключа, INCR увеличивает счетчик, TTL задает срок жизни записи. При большой нагрузке одной средней задержки уже недостаточно: p95 и p99 показывают, насколько медленными становятся запросы в хвосте распределения [7].

В [1] сравнивались шесть одинаковых профилей нагрузки. Redis в них показал самую высокую пропускную способность и самую низкую задержку, что связано с in-memory-архитектурой. PostgreSQL приближался к нему прежде всего в сценариях, где преобладало чтение, однако при этом сильнее загружал CPU.

Реализация Key-Value в PostgreSQL

PostgreSQL относится к объектно-реляционным СУБД [2]. Если в ней требуется хранить данные по модели Key-Value, обычно создают таблицу, где поле key становится первичным ключом или получает уникальный индекс [8]. Для самого значения можно выбрать несколько вариантов:

- text подходит для самого простого случая, когда значение хранится как строка, а поиск по ключу выполняется через B-tree-индекс;

- jsonb хранит JSON в бинарном виде и позволяет использовать GIN-индекс при поиске по вложенным полям [3];

- hstore предназначен для плоских текстовых пар «ключ — значение» внутри одной ячейки.

Главный плюс PostgreSQL здесь не в скорости одиночного GET, а в том, что KV-данные остаются частью реляционной СУБД. Их можно связывать внешними ключами, включать в транзакции и использовать в аналитических запросах. В [8] показано, что hstore и jsonb действительно позволяют воспроизводить поведение KV-хранилищ. При этом расходы на WAL и MVCC никуда не исчезают.

Реализация Key-Value в Redis

Redis работает как сервер структур данных в оперативной памяти [4]. Для обычной пары «ключ — значение» используется String с командами SET и GET. Когда объект состоит из нескольких полей, удобнее Hash с HSET и HGET [5]. В этом случае отдельное поле можно изменить без полной перезаписи всего объекта.

Низкая задержка Redis связана с тем, что команды выполняются над структурами, уже размещенными в памяти. Но реальная скорость зависит не только от этого. На нее влияют сетевой RTT, размер значения, число одновременно работающих клиентов и выбранный режим сохранности [9]. В [1] задержка Redis оставалась стабильной при изменении размера данных, тогда как у PostgreSQL результат заметнее зависел от сценария.

Сетевые задержки можно частично сократить с помощью pipelining. Redis позволяет отправить сразу несколько команд, не ожидая отдельного ответа после каждой. За счет этого уменьшается число циклов «запрос — ответ» и растет количество операций в секунду.

Сравнение архитектурных подходов

Архитектура PostgreSQL и Redis по-разному распределяет работу между скоростью и надежностью [10]. PostgreSQL выполняет запрос внутри

транзакционной модели, пишет изменения в WAL, создает новые версии строк и обслуживает индексы. Все это добавляет задержку, зато дает гарантии ACID [2]. Redis меняет структуры прямо в памяти. Сохранность при этом зависит от RDB-снимков или AOF-журнала, поэтому настройки персистентности напрямую влияют на компромисс между быстродействием и надежностью [4].

Иногда KV-подход выигрывает даже на отдельных OLAP-сценариях, если данные заранее хранятся в денормализованном виде [11]. Но как только появляются сложные аналитические запросы, связи между сущностями и необходимость работать с несколькими таблицами, возможности PostgreSQL становятся важнее чистой скорости доступа по ключу [6].

Методика исследования производительности

Объект исследования и состав тестовых данных

Объектом исследования выбрано хранилище пользовательских параметров и счетчиков. Такой сценарий встречается и в веб-приложениях, и в транспортных информационных системах [12]. Тестовый набор состоит из 1 000 000 записей. Длина ключа меняется от 16 до 64 символов, а значение представляет собой JSON-объект размером от 256 байт до 4 Кбайт.

Чтобы не сводить эксперимент к одному типу нагрузки, использованы три профиля:

- R80/W20 моделирует систему, где 80 % операций приходится на чтение и 20 % — на запись;
- W80/R20, наоборот, создает нагрузку с 80 % операций записи и 20 % операций чтения;
- R50/W50 задает равное соотношение чтения и записи.

Число параллельных клиентов менялось от 1 до 128. Такой диапазон позволяет увидеть не только работу системы при одиночных запросах, но и момент, когда из-за конкуренции за ресурсы рост производительности начинает замедляться.

Сценарии хранения и скрипты эксперимента

Для PostgreSQL проверялись три способа хранения:

1. В PG-1 ключ задается как text PRIMARY KEY, а значение хранится в text.

2. В PG-2 ключ также задается как text PRIMARY KEY, значение хранится в jsonb, дополнительно используется GIN-индекс.

3. В PG-3 ключ имеет тип text PRIMARY KEY, атрибуты хранятся в hstore и индексируются через GIN.

Для Redis использовались два варианта:

1. RD-1 основан на String и командах SET/GET.

2. RD-2 использует Hash и команды HSET/HGET.

Ниже приведен фрагмент SQL-скрипта, который создает таблицы PostgreSQL.

```
sql
CREATE EXTENSION IF NOT EXISTS hstore;

CREATE TABLE kv_text (
  key_name text PRIMARY KEY,
  value_text text NOT NULL,
  updated_at timestamp NOT NULL DEFAULT
    now()
);

CREATE TABLE kv_jsonb (
  key_name text PRIMARY KEY,
  value_doc jsonb NOT NULL,
  updated_at timestamp NOT NULL DEFAULT
    now()
);

CREATE TABLE kv_hstore (
  key_name text PRIMARY KEY,
  attrs hstore NOT NULL,
  updated_at timestamp NOT NULL DEFAULT
    now()
);

CREATE INDEX idx_kv_jsonb_gin ON
kv_jsonb USING gin (value_doc);
CREATE INDEX idx_kv_hstore_gin ON
kv_hstore USING gin (attrs);
```

Примеры операций чтения и записи:

```
sql
-- Чтение
SELECT value_text FROM kv_text WHERE key_
name = 'user:100500: profile';

-- Запись с обновлением при конфликте
INSERT INTO kv_text (key_name, value_text)
VALUES ('user:100500: profile',
'{"plan": "premium"}')
ON CONFLICT (key_name) DO UPDATE
SET value_text = EXCLUDED.value_text,
updated_at = now();
```

Примеры команд Redis:

```
bash
SET user:100500: profile '{"plan": "premium
","region": "spb"}'
GET user:100500: profile
HSET user:100500 plan premium region spb
status active
HGET user:100500 plan
```

Чтобы сравнение PostgreSQL и Redis отражало не только лабораторный максимум, но и поведение под нагрузкой, одной метрики недостаточно. Нужны показатели, которые одновременно показывают объем выполненной работы и стабильность времени отклика. Для высоконагруженных OLTP-систем, в том числе транспортных и логистических приложений [12], это особенно важно. При конкуренции за ресурсы среднее значение может выглядеть приемлемо, хотя часть запросов уже выполняется заметно медленнее [13].

Другой проблеме — фрагментации данных в MySQL и ее влиянию на чтение и запись — посвящена [14]. Здесь сравниваются уже две разные архитектуры, дисковая реляционная СУБД и in-memory-хранилище структур данных. В KV-сценариях сами операции очень короткие, зато выполняются часто. Поэтому даже небольшие накладные расходы внутри СУБД заметно отражаются на итоговом числе операций в секунду [1].

Метрики оценки и порядок измерений

В эксперименте используются две основные метрики: throughput и latency. Throughput

показывает, сколько успешных операций система выполняет за секунду, то есть какой поток запросов она фактически выдерживает [10]. Latency показывает время одной операции. Среднее значение удобно для общего сравнения, но при росте нагрузки важнее становятся р95 и р99. Например, р99 показывает границу, быстрее которой завершились 99% запросов, а оставшийся 1% оказался медленнее [7].

Отдельно измеряется объем, занимаемый данными. Эта величина нужна не только для технического сравнения. PostgreSQL хранит основной массив на диске и использует буферный кэш, а Redis размещает данные в оперативной памяти. Поэтому одинаковое число мегабайт в этих системах имеет разную стоимость при масштабировании.

Каждый сценарий сначала проходит прогрев (warm-up), после чего запускается серия измерений. Первый результат в расчет не включается. Во время него PostgreSQL может заполнять буферный кэш, Redis создает внутренние структуры, а клиентские соединения еще только выходят на рабочий режим. В итоговые таблицы попадает медиана нескольких повторов.

При тестировании записи отдельно фиксируется режим долговечности. PostgreSQL работает в обычной конфигурации с WAL и подтверждением транзакции. Для Redis используется AOF everysec, то есть вариант, в котором скорость не ставится полностью выше сохранности данных [9].

Преимущество по пропускной способности рассчитывается по формуле $K = T_{redis} / T_{pg}$, где T_{redis}

обозначает throughput Redis, а T_{pg} — throughput PostgreSQL. Для задержки отношение строится наоборот: $K_{lat} = L_{pg} / L_{redis}$.

Анализ результатов эксперимента

Сравнение объема хранения

Табл. 1 и рис. 1 показывают, сколько памяти или дискового пространства занял один и тот же тестовый набор в разных вариантах хранения.

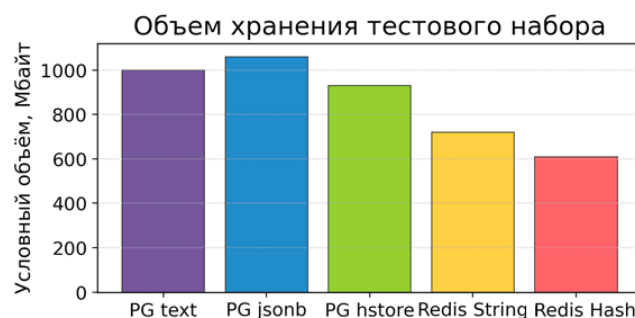


Рис. 1. Сравнение объема хранения тестового набора

По внутреннему объему Redis действительно выглядит компактнее. RD-2 Hash занимает 610 Мбайт, RD-1 String — 720 Мбайт. У PostgreSQL результат находится в диапазоне от 930 Мбайт для PG-3 до 1060 Мбайт для PG-2. Но эти цифры нельзя напрямую переводить в стоимость хранения: Redis требует оперативной памяти [4], тогда как PostgreSQL держит основной массив на диске и использует буферный кэш. Для большого объема холодных данных такой вариант может оказаться дешевле [2].

Таблица 1

Сравнение объема хранения тестового набора

Вариант	Данные, Мбайт	Служебные структуры, Мбайт	Итого, Мбайт	Комментарий
PG-1 key + text	780	220	1000	Базовая таблица и B-tree-индекс
PG-2 key + jsonb	820	240	1060	jsonb и GIN-индекс
PG-3 key + hstore	720	210	930	Компактнее для плоских атрибутов
RD-1 String	720	—	720	Ключи и строки в памяти
RD-2 Hash	610	—	610	Компактнее при группировке полей

Таблица 2

Сравнение оперативности чтения (GET)

Вариант	GET, ops/s	Avg, мс	p95, мс	p99, мс	Комментарий
PG-1 key + text	45 000	2,10	3,80	6,40	Стабильно при индексе
PG-2 key + jsonb	38 000	2,60	4,50	7,20	Дополнительная стоимость jsonb
PG-3 key + hstore	40 000	2,40	4,20	6,90	Близко к jsonb
RD-1 String	180 000	0,30	0,55	1,10	Минимальный путь чтения
RD-2 Hash	160 000	0,36	0,62	1,25	Чтение поля или объекта

Сравнение оперативности чтения

Численные результаты чтения по ключу собраны в табл. 2.

На чтении по ключу преимущество Redis видно особенно хорошо. RD-1 String достигает 180 000 GET ops/s при средней задержке 0,30 мс и p95 0,55 мс. Для PG-1 key + text получено 45 000 ops/s, 2,1 мс в среднем и 3,8 мс по p95. Причина различий связана с самим путем выполнения запроса. Redis получает значение непосредственно из памяти [5]. PostgreSQL выполняет SQL-запрос, проходит индекс, обращается к heap-строке и проверяет видимость ее версии [3]. Сходная картина наблюдалась и в [1].

Сравнение оперативности записи

Результаты для SET и UPDATE приведены в табл. 3.

На рис. 2 для чтения и записи сопоставлены задержки p95, рассчитанные по экспериментальным данным из табл. 2 и 3.

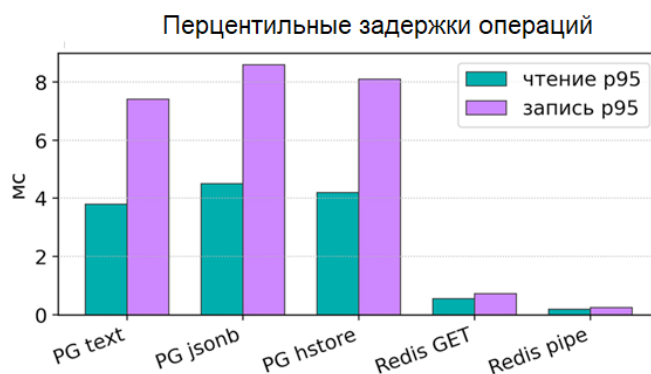


Рис. 2. Перцентильные задержки (p95) операций GET и SET/UPDATE

Запись сильнее нагружает PostgreSQL, чем чтение. Система пишет данные в WAL, обновляет

Таблица 3

Сравнение оперативности записи (SET/UPDATE)

Вариант	SET/UPDATE, ops/s	Avg, мс	p95, мс	p99, мс	Комментарий
PG-1 key + text	24 000	4,5	7,4	12,0	WAL и B-tree
PG-2 key + jsonb	20 000	5,2	8,6	14,5	Перезапись документа дороже
PG-3 key + hstore	22 000	4,9	8,1	13,2	Стоимость обновления атрибутов
RD-1 String AOF	135 000	0,42	0,72	1,60	Компромисс сохранности
RD-2 Hash AOF	120 000	0,50	0,85	1,85	Изменение поля

таблицу и индексы, а при UPDATE создает новую версию строки [2]. В PG-1 получено 24 000 операций в секунду при р95 7,4 мс. Redis в режиме RD-1 String AOF выполняет 135 000 операций в секунду при р95 0,72 мс. Он меняет структуру в памяти, а дополнительные расходы зависят от режима persistence [9]. Поэтому и в приводимых измерениях, и в [1] Redis показывает более низкую и более стабильную задержку.

Оценка поведения при росте параллельности

В табл. 4 показано, как меняется пропускная способность при увеличении числа параллельных клиентов.

При росте параллельности системы выходят на пределы по-разному [10]. Уже при одном клиенте Redis выполняет 38 000 GET ops/s против 7500 у PostgreSQL. При 32 клиентах значения достигают 180 000 и 45 000 ops/s соответственно. На 64 клиентах обе системы почти выходят на максимум: 190 000 GET ops/s у Redis и 47 000 у PostgreSQL. При 128 клиентах показатели снижаются до 185 000 и 44 000 ops/s. У PostgreSQL дополнительную конкуренцию создают индексы, WAL и блокировки [2, 3]. Redis Open Source традиционно выполняет команды в основном потоке, поэтому короткие операции обрабатываются быстро, но длинная команда способна задержать остальные запросы [4].

Еще заметнее разрыв становится при pipelining, поскольку клиент реже ждет отдельный ответ после каждой команды. В [9] Redis-кэширование сократи-

ло задержку чтения с 30 до 1,66 секунды, пропускная способность записи выросла на 50 %.

Рекомендации по выбору решения

Результаты эксперимента вместе с данными работ [1, 10] позволяют разделить сценарии применения PostgreSQL и Redis по характеру нагрузки и требованиям к данным.

PostgreSQL лучше подходит в следующих случаях:

- данные должны сохраняться долговременно и оставаться согласованными;
- в системе используются сложные SQL-запросы, соединения и аналитика [2];
- нужны транзакции и ограничения целостности [8];
- объем данных больше доступной оперативной памяти;
- необходимо хранить историю и проводить аудит изменений.

Redis лучше соответствует другому набору требований:

- критична задержка менее 1 мс [5];
- основная нагрузка состоит из обращений по ключу [4];
- хранятся временные данные, например, сессии, кэш или счетчики;
- система должна выполнять десятки тысяч операций в секунду [1];
- при выбранном режиме сохранности допустима потеря небольшого объема данных при сбое [9].

Таблица 4

Влияние параллельности на пропускную способность

Клиенты	PG GET, ops/s	Redis GET, ops/s	PG SET, ops/s	Redis SET, ops/s	Вывод
1	7500	38 000	4200	28 000	Redis быстрее без параллельности
8	32 000	120 000	18 000	92 000	Обе системы используют ресурсы
32	45 000	180 000	24 000	135 000	Redis сохраняет преимущество
64	47 000	190 000	24 500	138 000	Рост ограничен сервером и сетью
128	44 000	185 000	22 000	130 000	Появляются очереди и рост р99

Во многих прикладных системах разумнее не выбирать одну СУБД, а использовать PostgreSQL и Redis вместе:

- такой вариант подходит, когда одновременно есть горячие и холодные данные [12];
- часто запрашиваемые значения нужно отдавать быстро, но основной набор данных должен оставаться надежным;
- при этом архитектура допускает асинхронную синхронизацию.

Типичный сценарий выглядит так. Сначала приложение запрашивает ключ в Redis. Если его там нет, данные читаются из PostgreSQL, помещаются в Redis с TTL и затем возвращаются клиенту [15]. При изменении записи PostgreSQL остается источником истины, а соответствующий ключ в Redis удаляется или инвалидируется.

В [9] показано, что сочетание Redis-кэширования, пула соединений и пакетной обработки помогает масштабировать Node.js-приложения, работающие с PostgreSQL.

Заключение

В исследовании сравнивались два способа реализации модели «ключ — значение»: PostgreSQL и Redis. Сначала были рассмотрены особенности их архитектуры и типовые операции, затем обе системы проверялись под одинаковой нагрузкой [1–6, 10]. Это позволило связать различия в задержке и пропускной способности не только с результатами теста, но и с тем, как каждая СУБД обрабатывает запрос.

Эксперимент на наборе из 1 000 000 записей дал несколько практических результатов:

1. Для точечных GET/SET Redis обеспечивает в 5–10 раз меньшую задержку чтения и в 3–5 раз более высокую пропускную способность по сравнению с PostgreSQL [1].
2. Задержка Redis остается стабильнее при изменении размера данных. У PostgreSQL результат сильнее зависит от конкретного сценария работы [8].
3. При увеличении параллельности до 64 клиентов Redis сохраняет заметное преимущество. На 128 клиентах рост прекращается и начинает проявляться ограничение однопоточной архитектуры [4].

4. Pipelining дает Redis еще один прирост. В рассмотренных условиях пропускная способность повышается в 2–3 раза [5].

5. PostgreSQL медленнее при точечном доступе, но его сильная сторона заключается в другом. СУБД поддерживает транзакции, сложные запросы и долговременное хранение, поэтому лучше подходит для основных бизнес-данных [2, 3].

На практике эти свойства дополняют друг друга. PostgreSQL целесообразно оставить основной базой данных и источником истины, а Redis использовать для горячих ключей, временных записей и операций с высокой частотой [9, 11]. Выбор схемы при этом зависит от профиля нагрузки, требований к сохранности и бюджета сопровождения.

Полученные результаты можно использовать при проектировании высоконагруженных информационных систем. Они полезны администраторам баз данных, разработчикам и техническим архитекторам, в том числе при работе с транспортными и логистическими системами [12, 15].

Для интеллектуальных транспортных систем эти различия имеют вполне прикладной смысл. В железнодорожной инфраструктуре постоянно обрабатываются данные о подвижном составе; телеметрия бортовых датчиков; сведения о скорости, температуре, вибрации и нагрузке на ось. К этому добавляются сессионные данные диспетчеров и авторизационные токены. Во многих запросах объект определяется одним идентификатором, например номером вагона, локомотива, станции или маршрута. При пиковой нагрузке таких обращений одновременно приходят десятки и сотни. В этих условиях Redis с задержкой чтения в 5–10 раз ниже и стабильными р95/р99 можно использовать для горячих данных о движении поездов и состоянии инфраструктуры. PostgreSQL при этом остается источником долговременных записей, журналов событий, нормативно-справочной информации, планов-графиков движения и отчетов о техническом обслуживании.

Та же методика нагрузочного тестирования подходит для предварительной проверки аппаратно-программных решений на транспортных полигонах.

Здесь важны не только средняя скорость, но и хвостовые задержки, поскольку несколько медленных запросов способны затормозить критичную операцию. Это актуально, например, для систем предиктивной диагностики рельсов и подвижного состава [16] и для цифровых двойников железнодорожной инфраструктуры [17]. Выбор схемы

кэширования и распределения нагрузки в таких системах влияет на время, за которое диспетчер получает нужные данные. Поэтому результаты исследования можно использовать при подготовке регламентов испытаний производительности для центров управления перевозками и решений класса «умная железная дорога».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Performance Comparison of Redis, Memcached, MySQL, and PostgreSQL: A Study on Key-Value and Relational Databases / D. Almeida [et al.] // Proceedings of the 2023 Second International Conference on Smart Technologies for Smart Nation (SmartTechCon) (Singapore, Singapore, 18–19 August 2023). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. Pp. 902–907. DOI: 10.1109/SmartTechCon57526.2023.10391649
2. Хомоненко А. Д., Цыганков В. М., Мальцев М. Г. Базы данных: учебник для вузов / под ред. А. Д. Хомоненко. 6-е изд., доп. СПб.: Корона-Век, 2009. 736 с.
3. Коннолли Т., Бегг К. Базы данных: проектирование, реализация и сопровождение: теория и практика. 3-е издание = Database Systems: A Practical Approach to Design, Implementation, and Management. Third Edition / пер. с англ. Р. Г. Имамутдиновой и К. А. Птицына; под ред. К. А. Птицына. М.: Вильямс, 2017. 1440 с.
4. Клеппман М. Высоконагруженные приложения. Программирование, масштабирование, поддержка. СПб.: Питер, 2018. 640 с.
5. Gembalczyk D., Schuhknecht F. M., Dittrich J. An Experimental Analysis of Different Key-Value Stores and Relational Databases // Datenbanksysteme für Business, Technologie und Web (BTW 2017): Proceedings 17 Fachtagung des GI-Fachbereichs “Datenbanken und Informationssysteme” (DBIS) (Stuttgart, Germany, 06–10 March 2017) / B. Mitschang [et al.] (eds). Lecture Notes in Informatics. Vol. 265. Bonn: Gesellschaft für Informatik, 2017. Pp. 351–360.
6. Salunke S. V., Ouda A. A Performance Benchmark for the PostgreSQL and MySQL Databases // Future Internet. 2024. Vol. 16, iss. 10. Art. no. 382. 22 p. DOI: 10.3390/fi16100382
7. Dean J., Barroso L. A. The Tail at Scale // Communications of the ACM. 2013. Vol. 56, no. 2. Pp. 74–80. DOI: 10.1145/2408776.2408794
8. Sikh A., Axén J. High-Performing Cloud Native SW Using Key-Value Storage or Database for Externalized States. Bachelor’s Thesis. Department of Computer and Information Science, Linköping University. Linköping, 2023. 18 p. URL: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1768552/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 03.08.2026).
9. Optimizing Asynchronous Performance in Node.js with Express and PostgreSQL / M. D. Imam Sakti [et al.] // Procedia Computer Science. 2025. Vol. 269. Pp. 172–181. DOI: 10.1016/j.procs.2025.08.270
10. High-Throughput Real-Time Leaderboard a Comparative Performance Analysis of PostgreSQL and Redis / S. Khanum [et al.] // Proceedings of International Conference on Computational Technologies for Research in Data Analytics (ICCTRDA 2025) (Da Nang, Vietnam, 21–22 November 2025). Volume 3 / N. G. Nhu [et al.] (eds). Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 1988. Cham: Springer, 2026. Pp. 114–126. DOI: 10.1007/978-3-032-26898-3_11
11. Adaptive and Scalable Database Management with Machine Learning Integration: A PostgreSQL Case Study / M. Abbasi [et al.] // Information. 2024. Vol. 15, iss. 9. Art. no. 574. 25 p. DOI: 10.3390/info15090574
12. Малыгин Д. С. Проблемы производительности реляционных баз данных в распределенных архитектурах и стратегии их решения // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 10. С. 61–71. DOI: 10.17513/snt.40173
13. Privalov M. V., Stupina M. V. Improving Web-Oriented Information Systems Efficiency Using Redis Caching Mechanisms // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2024. Vol. 33, no. 3. Pp. 1667–1675. DOI: 10.11591/ijeecs.v33.i3.pp1667-1675

14. Черкасов С. Д., Хомоненко А. Д. Исследование влияния фрагментации данных на производительность чтения/записи и методы ее устранения в MySQL (InnoDB) // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 2 (46). С. 64–74. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-246-64-74
15. Zulfa M. I., Fadli A., Wardhana A. W. Application Caching Strategy Based on In-Memory Using Redis Server to Accelerate Relational Data Access // Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer. 2020. Vol. 8, no. 2. Pp. 157–163. DOI: 10.14710/jtsiskom.8.2.2020.157-163
16. Implementation of an AI-Based Predictive Structural Health Monitoring Strategy for Bonded Insulated Rail Joints Using Digital Twins Under Varied Bolt Conditions / G. Bianchi [et al.] // Railway Engineering Science. 2025. Vol. 33. No. 4. Pp. 703–720. DOI: 10.1007/s40534-024-00371-3
17. Ariyachandra M. R. M. F., Wen Y., Yu J. Advancing Rail Infrastructure: Integrating Digital Twins and Cyber-Physical Systems for Predictive Maintenance // Proceedings of the 2025 European Conference on Computing in Construction and 42nd International CIB W78 Conference on Information Technology in Construction (Porto, Portugal, 14–17 July 2025) / Petrova E. [et al.] (eds). European Council on Computing in Construction, 2025. Pp. 1266–1273. DOI: 10.35490/EC3.2025.272

Дата поступления: 10.08.2026

Решение о публикации: 27.08.2026

Investigation of Key-Value Model Performance in PostgreSQL and Redis: A Comparative Analysis of Read/Write Operations and Parallel Load Impact

- | | |
|------------------------------|--|
| Ratmir A. Voloshin | — 3rd-year Bachelor's Degree Student in 38.03.05 Business Informatics. Research interests: information systems, development and research of characteristics of applications for working with databases. E-mail: vratmir@yandex.ru |
| Anatoly D. Khomonenko | — Dr. Sci. in Engineering, Full Professor. Professor of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: information systems, big data processing, probabilistic modeling of geographic information systems, genetic algorithms, information security. E-mail: khomon@mail.ru |
| Stepan S. Yudnikov | — M. S., Postgraduate Student of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: information systems, development and performance analysis of database applications. E-mail: s.yudnikovv@gmail.com |

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Voloshin R. A., Khomonenko A. D., Yudnikov S. S. Investigation of Key-Value Model Performance in PostgreSQL and Redis: A Comparative Analysis of Read/Write Operations and Parallel Load Impact, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 3 (47), pp. 44–55. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-44-55 (In Russian)

Abstract. *An experimentally substantiated approach to comparing the performance of the key-value model implementation in PostgreSQL and Redis is proposed. **Purpose:** to evaluate the latency and throughput of read and write operations under varying degrees of parallel load. **Methods:** analysis of PostgreSQL architecture (MVCC, WAL, B-tree and GIN indexes, jsonb and hstore types) and Redis architecture (in-memory storage, strings and hashes, TTL, pipelining); creation of an experimental testbed; generation of a test table with 1,000,000 records; load testing using pgbench and redis-benchmark with parallelism from 1 to 128 clients;*

measurement of throughput, average and tail latencies (p95, p99). **Results:** Redis provides 5–10 times lower read latency and 3–5 times higher throughput compared to PostgreSQL for point GET/SET operations; the use of pipelining additionally increases throughput by 2–3 times; PostgreSQL retains advantages in versatility, supporting transactions, complex queries, and long-term storage. **Practical significance:** the developed testing methodology and obtained quantitative estimates are applicable when choosing a storage architecture for high-load information systems, including monitoring and tracking systems in transport.

Keywords: PostgreSQL, Redis, key-value model, latency, throughput, high-load transactions, jsonb, hstore, in-memory storage

REFERENCES

1. Almeida D., et al. Performance Comparison of Redis, Memcached, MySQL, and PostgreSQL: A Study on Key-Value and Relational Databases, *Proceedings of the 2023 Second International Conference on Smart Technologies for Smart Nation (SmartTechCon)*, Singapore, Singapore, August 18–19, 2023. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023, pp. 902–907. DOI: 10.1109/SmartTechCon57526.2023.10391649
2. Khomonenko A. D., Tsygankov V. M., Maltsev M. G. Bazy dannykh: uchebnik dlya vuzov [Databases: A Textbook for Universities]. Saint Petersburg, Korona-Vek Publishing House, 2009, 736 p. (In Russian)
3. Connolly T. M., Begg C. E. Bazy dannykh: proektirovanie, realizatsiya i soprovozhdenie: teoriya i praktika. Tretye izdanie [Database Systems: A Practical Approach to Design, Implementation, and Management. Third Edition]. Moscow, Williams Publishing House, 2017, 1440 p. (In Russian)
4. Kleppmann M. Vysokonagruzhennyye prilozheniya. Programmirovaniye, masshtabirovaniye, podderzhka [Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems]. Saint Petersburg, Piter Publishing House, 2018, 640 p. (In Russian)
5. Gembalezyk D., Schuhknecht F. M., Dittrich J. An Experimental Analysis of Different Key-Value Stores and Relational Databases. In: Mitschang B., et al. (eds) *Datenbanksysteme für Business, Technologie und Web (BTW 2017): Proceedings 17 Fachtagung des GI-Fachbereichs "Datenbanken und Informationssysteme" (DBIS)*, Stuttgart, Germany, March 06–10, 2017. Lecture Notes in Informatics, vol. 265. Bonn, Gesellschaft für Informatik, 2017, pp. 351–360.
6. Salunke S. V., Ouda A. A Performance Benchmark for the PostgreSQL and MySQL Databases, *Future Internet*, 2024, vol. 16, iss. 10, art. no. 382, 22 p. DOI: 10.3390/fi16100382
7. Dean J., Barroso L. A. The Tail at Scale, *Communications of the ACM*, 2013, vol. 56, no. 2, pp. 74–80. DOI: 10.1145/2408776.2408794
8. Sikh A., Axén J. High-Performing Cloud Native SW Using Key-Value Storage or Database for Externalized States. Bachelor's Thesis. Department of Computer and Information Science, Linköping University. Linköping, 2023, 18 p. Available at: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1768552/FULLTEXT01.pdf> (accessed: August 03, 2026).
9. Imam Sakti M. D., et al. Optimizing Asynchronous Performance in Node.js with Express and PostgreSQL, *Procedia Computer Science*, 2025, vol. 269, pp. 172–181. DOI: 10.1016/j.procs.2025.08.270
10. Khanum S., et al. High-Throughput Real-Time Leaderboard a Comparative Performance Analysis of PostgreSQL and Redis. In: Nhu N. G., et al. (eds) *Proceedings of International Conference on Computational Technologies for Research in Data Analytics (ICCTFDA 2025)*, Da Nang, Vietnam, 21–22 November 2025. Volume 3. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1988. Cham, Springer, 2026, pp. 114–126. DOI: 10.1007/978-3-032-26898-3_11
11. Abbasi M., et al. Adaptive and Scalable Database Management with Machine Learning Integration: A PostgreSQL Case Study, *Information*, 2024, vol. 15, iss. 9, art. no. 574, 25 p. DOI: 10.3390/info15090574
12. Malygin D. S. Problemy proizvoditelnosti relyatsionnykh baz dannykh v raspredelennykh arkhitekturakh i strategii ikh resheniya [Performance Issues of Relational Databases in Distributed Architectures and Strategies for Resolution], *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii [Modern High Technologies]*, 2024, no. 10, pp. 61–71. DOI: 10.17513/snt.40173 (In Russian)

13. Privalov M. V., Stupina M. V. Improving Web-Oriented Information Systems Efficiency Using Redis Caching Mechanisms, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2024, vol. 33, no. 3, pp. 1667–1675. DOI: 10.11591/ijeecs.v33.i3.pp1667-1675
14. Cherkasov S. D., Khomonenko A. D. Issledovanie vliyaniya fragmentatsii dannykh na proizvoditelnost chteniya/zapisi i metody ee ustraneniya v MySQL (InnoDB) [Investigation of Data Fragmentation Impact on Read/Write Performance and Methods for Its Elimination in MySQL (InnoDB)], *Intellektualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport]*, 2026, no. 2 (46), pp. 64–74. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-246-64-74 (In Russian)
15. Zulfa M. I., Fadli A., Wardhana A. W. Application Caching Strategy Based on In-Memory Using Redis Server to Accelerate Relational Data Access, *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 157–163. DOI: 10.14710/jtsiskom.8.2.2020.157-163
16. Bianchi G., et al. Implementation of an AI-Based Predictive Structural Health Monitoring Strategy for Bonded Insulated Rail Joints Using Digital Twins Under Varied Bolt Conditions, *Railway Engineering Science*, 2025, vol. 33, no. 4, pp. 703–720. DOI: 10.1007/s40534-024-00371-3
17. Ariyachandra M. R. M. F., Wen Y., Yu J. Advancing Rail Infrastructure: Integrating Digital Twins and Cyber-Physical Systems for Predictive Maintenance. In: Petrova E., et al. (eds) *Proceedings of the 2025 European Conference on Computing in Construction and 42nd International CIB W78 Conference on Information Technology in Construction*, Porto, Portugal, July 14–17, 2025. European Council on Computing in Construction, 2025, pp. 1266–1273. DOI: 10.35490/EC3.2025.272

Received: August 10, 2026

Accepted: August 27, 2026

УДК 538.91+004.928

Свойства полупроводника на основе атомов кремния: интерактивная трехмерная модель на языке C#

**Гильванов Ринат
Гаффанович**

— кандидат воен. наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, виртуальная и дополненная реальность, иммерсивные технологии. E-mail: gilvanov1950@mail.ru

**Горн Даниил
Игоревич**

— студент бакалавриата 3-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: разработка интерактивных игр, веб-приложений и платформ, оптимизация графических и сетевых компонентов. E-mail: dangorn9@gmail.com

**Королева Арина
Юрьевна**

— студент бакалавриата 3-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: информационные системы, визуализация физических процессов. E-mail: akoroleva015@gmail.com

**Несенов Егор
Станиславович**

— студент бакалавриата 3-го курса направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: дополненная реальность и имитационное моделирование, исследование свойств материалов с помощью ПО. E-mail: egornes11@gmail.com

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Свойства полупроводника на основе атомов кремния: интерактивная трехмерная модель на языке C# / Р. Г. Гильванов, Д. И. Горн, А. Ю. Королева, Е. С. Несенов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 3 (47). С. 56–62. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-56-62

Аннотация. Представлено исследование, посвященное моделированию полупроводников на основе кремния с использованием технологий трехмерного проектирования в среде Unity на языке C#. В ходе исследования рассмотрены физические основы проводимости, типы примесей и особенности формирования р-п-перехода. **Цель:** визуализация структуры кристаллической решетки кремния и демонстрация влияния трехвалентных и пятивалентных примесей на проводимость полупроводника. **Методы:** использование инструментов Unity и C# для создания интерактивной трехмерной модели атомной структуры и кристаллической решетки кремния. **Результаты:** демонстрируют возможности применения интерактивных 3D-моделей для наглядного изучения физических процессов на атомном уровне; архитектура модели предусматривает дальнейшее расширение с использованием технологии дополненной реальности (AR Foundation). **Практическая значимость:** заключается в использовании созданной модели в образовательных целях — для визуализации физических явлений и повышения интереса обучающихся к изучению электроники и материаловедения.

Ключевые слова: полупроводник, кремний, атомная структура, проводимость, трехмерное моделирование, кристаллическая решетка, электронные свойства

2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

Введение

Современная электроника базируется на полупроводниках, в которых ключевую роль играет кремний. Он используется в диодах, микропроцессорах, транзисторах и солнечных батареях. Понимание физических свойств кремния и работы p - n -переходов имеет ключевое значение для проектирования и оптимизации электронных устройств [1, 2].

Представленная в исследовании модель реализована в среде Unity на языке C#, что позволяет демонстрировать влияние трехвалентных и пятивалентных примесей на проводимость и принцип работы диода. Архитектура модели предусматривает дальнейшее расширение с использованием технологии дополненной реальности (Augmented Reality, AR), что позволит наблюдать структуру кремния в наложении на реальное окружение пользователя [3, 4]. Такой подход расширяет возможности классических методов преподавания, делая процесс обучения более наглядным [5].

Физические основы полупроводников

В основе большинства полупроводниковых устройств лежит кремний (Si) — элемент с четырьмя валентными электронами, способный образовывать устойчивую тетраэдрическую кристаллическую решетку (рис. 1).

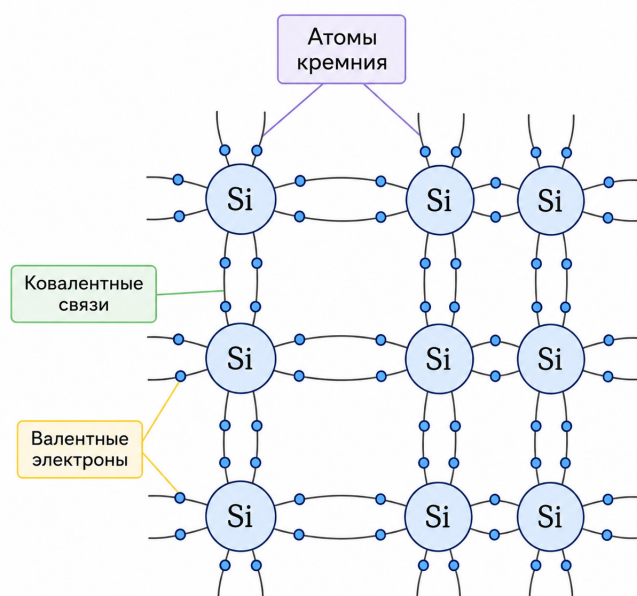


Рис. 1. Упрощенная модель кристаллической решетки кремния с показанными связями между атомами

В чистом виде кремний обладает малой проводимостью, однако при добавлении примесей его свойства резко изменяются [1]. Распределение электронов по слоям атома можно описать формулой $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$, где $1s^2$ — первый энергетический уровень, 2 электрона; $2s^2 2p^6$ — второй уровень, 8 электронов; $3s^2 3p^2$ — третий уровень, 4 электрона.

Тип проводимости — это характеристика полупроводника, определяющая, каким образом в материале переносится электрический ток. Выбор типа проводимости напрямую влияет на работу устройства, его эффективность и режимы функционирования.

Электронная проводимость (n -тип) возникает при введении примесей с пятью валентными электронами, таких как фосфор или мышьяк. Лишний электрон примеси слабо связан с атомом и становится свободным носителем заряда, что позволяет создавать электронные компоненты с высокой проводимостью и быстрым откликом [1, 2].

Дырочная проводимость (p -тип) формируется при добавлении примесей с тремя валентными электронами, например бора или алюминия. В кристаллической решетке возникают дырки — места, где отсутствует электрон, которые ведут себя как положительно заряженные носители [1, 2].

На рис. 2 показан p - n -переход, где ток в материалах p -типа переносится преимущественно дырками. Когда области p - и n -типа соприкасаются, образуется p - n -переход, являющийся основой полупроводниковых диодов. В нем электроны и дырки создают обедненный слой и внутреннее электрическое поле, которое обеспечивает протекание тока только в одном направлении [2, 6].

Электрическое сопротивление является параметром, определяющим поведение полупроводника, которое зависит от структуры кристалла, температуры и наличия примесей. Для описания зависимости сопротивления от геометрических параметров образца используется формула

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где R — электрическое сопротивление,

ρ — удельное сопротивление материала,

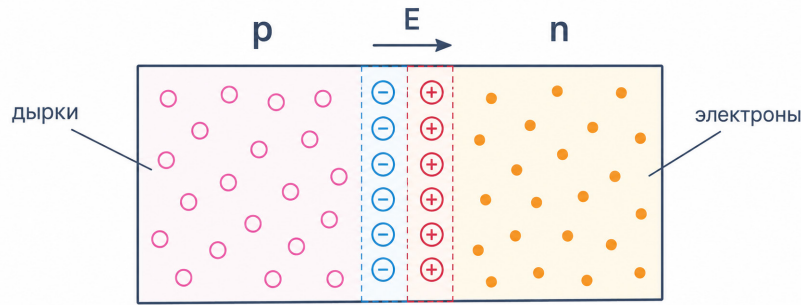


Рис. 2. Схема p - n -перехода с направлением движения носителей заряда (электронов и дырок)

l — длина образца,

S — площадь поперечного сечения.

Для кремния удельное сопротивление ρ в чистом виде достаточно велико — от 103 до 105 Ом·см, что объясняется малой концентрацией свободных носителей заряда. Однако при добавлении примесей сопротивление резко уменьшается, поскольку изменяется количество свободных электронов или дырок. Изменяя концентрацию и тип примесей можно формировать p - n -переходы, что лежит в основе работы диодов и других полупроводниковых приборов [7].

Понимание типов проводимости важно даже для упрощенной модели, так как это знание позволяет корректно отображать поведение электронов: лишний электрон (n -тип) или недостаток электрона (p -тип).

Моделирование полупроводника в среде Unity на языке C#

Разработанная модель реализована в среде Unity на языке C# и представляет собой интерактивное трехмерное приложение, демонстрирующее атомную структуру кремния и структуру его кристаллической решетки. Управление моделью осуществляется через панель кнопок, расположенную в правой части экрана: пользователь может последовательно переключаться между демонстрацией атома кремния с различным числом валентных электронов, кристаллической решеткой без примесей и решеткой с примесями, формирующими p - или n -тип проводимости [8, 9].

При выборе пункта «Трехвалентный атом кремния» на экране отображается планетарная модель атома с тремя электронами на внешней орбите

(рис. 3). Конфигурация соответствует атому кремния, потерявшему один валентный электрон, и используется в модели для пошагового объяснения того, как формируется дефицит электрона при замещении атома кремния трехвалентной примесью.

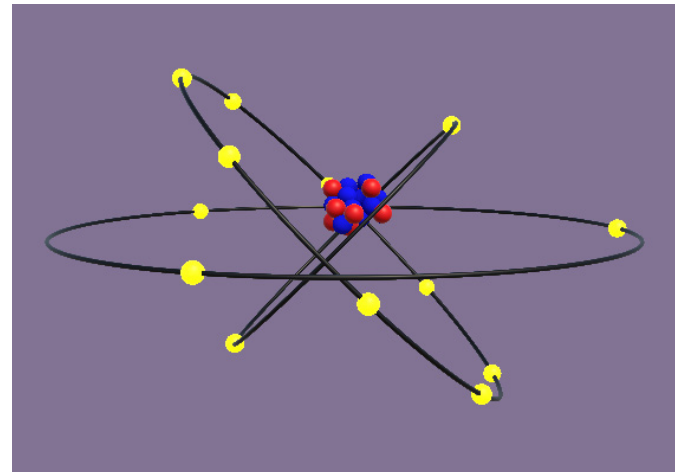


Рис. 3. Планетарная модель атома кремния с тремя валентными электронами на внешней орбите

Следующий режим, «Четырехвалентный атом кремния», показывает атом в его естественном, неискаженном состоянии с полным набором из четырехвалентных электронов, равномерно распределенных по орбите (рис. 4). Этот вид используется как опорный, эталонный, с которым сравниваются модели трех- и пятивалентных конфигураций.

В режиме «Пятивалентный атом кремния» на орбите вокруг ядра отображаются пять электронов (рис. 5), что иллюстрирует электронную конфигурацию атома после замещения атома кремния пятивалентной примесью. Именно этот лишний пятый электрон в дальнейшем становится свободным носителем заряда в n -типе проводимости.

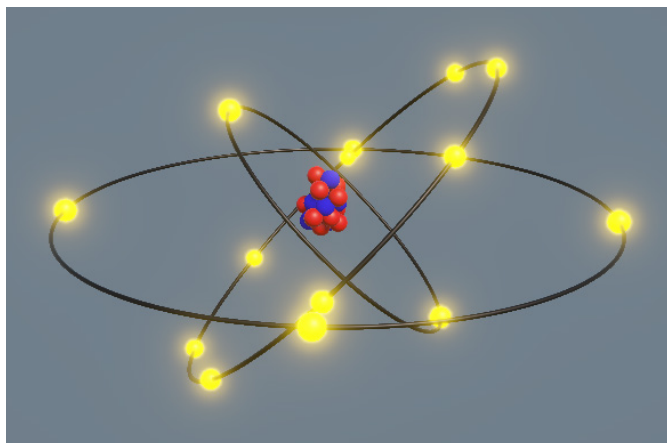


Рис. 4. Планетарная модель атома кремния с четырьмя валентными электронами — эталонная конфигурация чистого кремния

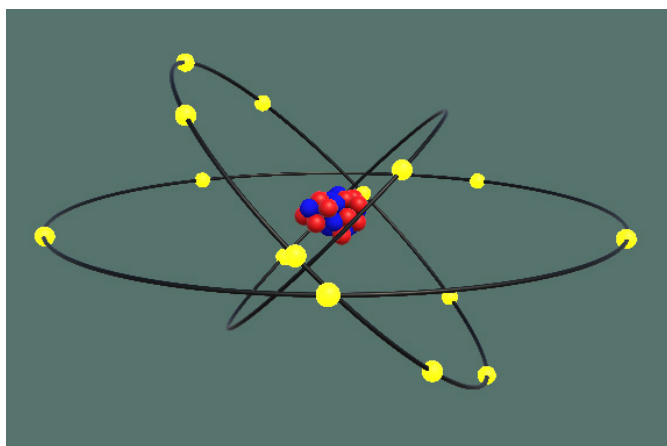


Рис. 5. Планетарная модель атома кремния с пятью валентными электронами

Раздел «Кристаллическая решетка кремния IV» переключает визуализацию с одиночного атома на фрагмент кристаллической решетки (рис. 6). Атомы кремния показаны как однородные темно-серые сферы, соединенные попарными линиями связей, на которых отмечены общие электронные пары. Все связи в этом режиме заполнены, что соответствует чистому, беспримесному кремнию с минимальной собственной проводимостью.

При активации режима «Проводимость p -тип (примесь: бор)» один из узлов решетки замещается атомом бора, выделенным на модели темно-красным цветом (рис. 7). Поскольку бор имеет только три валентных электрона, одна из четырех связей с соседними атомами кремния остается незаполненной — на модели это показано разомкнутым

символом связи рядом с атомом примеси. Незаполненная связь представляет собой дырку — вакантное место, которое может занять электрон из соседней связи, что и обеспечивает дырочный механизм проводимости.

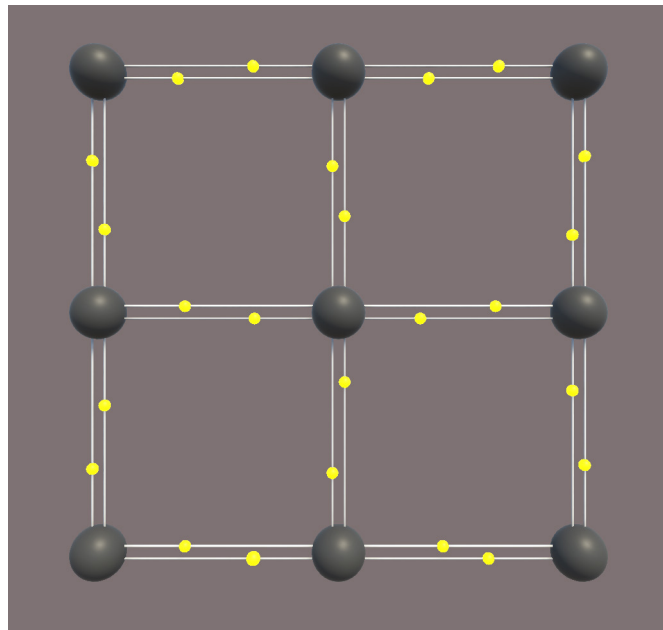


Рис. 6. Фрагмент кристаллической решетки чистого кремния без примесей: узлы решетки и валентные связи между атомами

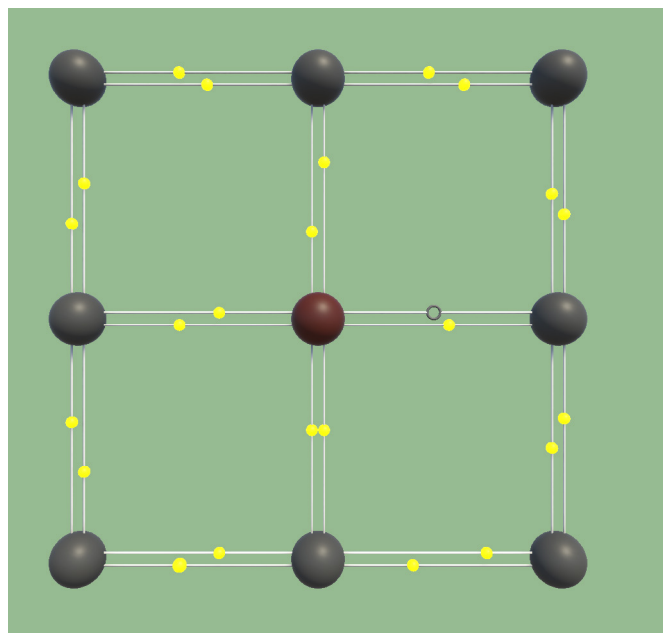


Рис. 7. Узел кристаллической решетки с атомом бора (p -тип); незаполненная связь иллюстрирует образование дырки

Режим «Проводимость n -тип (примесь: мышьяк)» демонстрирует противоположный случай: атом мышьяка, выделенный синим цветом, занимает узел решетки и образует все четыре связи с соседними атомами кремния, однако его пятый валентный электрон не участвует в связях и показан на модели отдельным лучом, выходящим за пределы структуры решетки (рис. 8). Этот электрон слабо удерживается ядром примеси и легко переходит в свободное состояние, формируя электронный механизм проводимости.

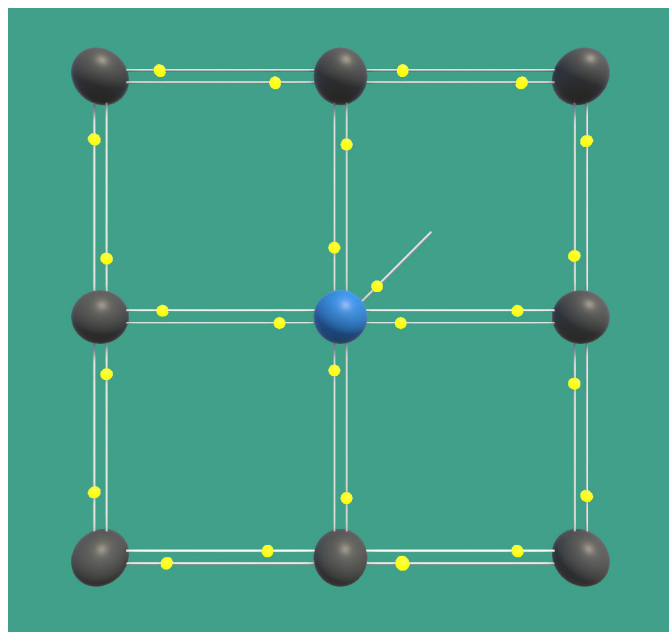


Рис. 8. Узел кристаллической решетки с атомом мышьяка (n -тип); пятый электрон примеси показан как свободный носитель заряда

Переключение между режимами модели последовательно воспроизводит логику изложения теоретического материала: от строения изолированного атома кремния к строению кристаллической решетки и далее к эффекту, который производят на ре-

шетку трех- и пентавалентные примеси. Поэтапное визуальное сопровождение позволяет нагляднее связать абстрактные понятия «дырка» и «свободный электрон» с конкретной геометрией атомных связей, что особенно полезно при изучении физических основ полупроводников впервые [10].

Заключение

В работе представлена интерактивная трехмерная модель полупроводника на основе кремния, реализованная в среде Unity на языке C#. Модель позволяет визуализировать атомную структуру кремния, переходы между трех-, четырех- и пентавалентными конфигурациями атома, а также наглядно демонстрировать механизм образования дырочной (p -тип, примесь бора) и электронной (n -тип, примесь мышьяка) проводимости на уровне кристаллической решетки.

Интерактивное переключение между режимами модели дает возможность пошагово проследить логику формирования примесной проводимости — от строения отдельного атома до его влияния на кристаллическую решетку в целом, что делает модель удобным вспомогательным инструментом при изучении физики полупроводников.

Практическая значимость работы заключается в применении созданной модели в образовательном процессе при изучении дисциплин, связанных с физикой твердого тела, электроникой и материаловедением. Архитектура проекта предусматривает дальнейшее расширение модели с использованием технологии дополненной реальности для отображения объектов в реальном окружении пользователя на мобильных устройствах [3, 4, 11]. Данное направление, а также реализация визуализации p - n -перехода в интерактивном режиме и добавление зависимости проводимости от температуры определены как направления дальнейших исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 392 с.
2. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников: учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1990. 688 с.
3. Augmented Reality Technology in Teaching about Physics: A Systematic Review of Opportunities and Challenges / A. Vidak [et al.] // European Journal of Physics. 2024. Vol. 45, no. 2. Art. no. 023002. DOI: 10.1088/1361-6404/ad0e84

4. Arymbekov B. S., Turekhanova K. M. Augmented Reality in Physics Education: A Tool for Intellectual Learning // Contemporary Educational Researches Journal. 2025. Vol. 15, iss. 1. Pp. 33–44. DOI: 10.18844/cej.v15i1.9629
5. Суслова И. Б. Цифровые технологии в преподавании и обучении: новые ресурсы и трансформация педагогических методик // Вестник Университета Российского инновационного образования. 2024. № 4. С. 27–42. DOI: 10.24412/3034-3445-2024-4-27-42
6. Исследование переходных процессов в полупроводниковых структурах: пособие / Н. А. Поклонский [и др.]. Минск: БГУ, 2009. 103 с.
7. Любимский В. М. Модель проводимости поликристаллического кремния р-типа, учитывающая растекание тока в кристаллитах // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40, вып. 3. С. 307–313.
8. Simon J. Augmented Reality Application Development Using Unity and Vuforia // Interdisciplinary Description of Complex Systems. 2023. Vol. 21, iss. 1. Pp. 69–77. DOI: 10.7906/indecs.21.1.6
9. Шевляков М. А., Хворов Р. А. 3D моделирование в образовательном процессе вуза // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы: материалы 9-й Всероссийской научно-практической конференции (Воронеж, Россия, 12–16 июня 2018 г.). Воронеж: Воронежский институт — филиал Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, 2018. С. 216–218.
10. Баяндин Д. В. Классификация интерактивных компьютерных моделей и структура процесса познания в физике // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. 8 с.
11. Linowes J. Augmented Reality with Unity AR Foundation: A Practical Guide to Cross-Platform AR Development with Unity 2020 and Later Versions. Birmingham: Packt Publishing, 2021. 382 p.

Дата поступления: 22.06.2026

Решение о публикации: 25.08.2026

Properties of a Semiconductor Based on Silicon Atoms: An Interactive Three-Dimensional Model in C#

- Rinat G. Gilvanov** — PhD in Military Sciences, Associate Professor of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: information systems, virtual and augmented reality, immersive technologies. E-mail: gilvanov1950@mail.ru
- Daniil I. Gorn** — 3rd-year Bachelor’s Degree Student in 09.03.01 Informatics and Computer Technology. Research interests: development of interactive games, web applications and platforms, optimization of graphics and network components. E-mail: dangorn9@gmail.com
- Arina Yu. Koroleva** — 3rd-year Bachelor’s Degree Student in 09.03.01 Informatics and Computer Technology. Research interests: information systems, visualization of physical processes. E-mail: akoroleva015@gmail.com
- Egor S. Nesenov** — 3rd-year Bachelor’s Degree Student in 09.03.01 Informatics and Computer Technology. Research interests: augment reality and simulation modeling, study of material properties using software. E-mail: egornes11@gmail.com

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Gilvanov R. G., Gorn D. I., Koroleva A. Yu., Nesenov E. S. Properties of a Semiconductor Based on Silicon Atoms: An Interactive Three-Dimensional Model in C#, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 3 (47), pp. 56–62. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-56-62 (In Russian)

Abstract. A study on the modeling of silicon-based semiconductors using 3D design technologies in the Unity environment with C# is presented. The study examines the physical fundamentals of conductivity, types of impurities, and the features of p-n junction formation. **Purpose:** is to visualize the crystalline lattice structure

of silicon and to demonstrate the effect of trivalent and pentavalent impurities on the conductivity of the semiconductor. **Methods:** the use of Unity and C# tools to create an interactive three-dimensional model of the atomic structure and crystalline lattice of silicon. **Results:** demonstrate the potential of interactive 3D models for the visual study of physical processes at the atomic level; the model's architecture provides for further expansion using augmented reality technology (AR Foundation). **Practical significance:** lies in the use of the developed model for educational purposes, namely, to visualize physical phenomena and increase students' interest in studying electronics and materials science.

Keywords: semiconductor, silicon, atomic structure, conductivity, 3D modeling, crystal lattice, electronic properties

REFERENCES

1. Shalimova K. V. Fizika poluprovodnikov: uchebnik dlya vuzov [Physics of Semiconductors: A Textbook for Universities]. Moscow, Energoatomizdat Publishing House, 1985, 392 p. (In Russian)
2. Bonch-Bruevich V. L., Kalashnikov S. G. Fizika poluprovodnikov: uchebnoe posobie dlya vuzov [Physics of Semiconductors: A Study Guide for Universities]. Moscow, Nauka Publishers, 1990, 688 p. (In Russian)
3. Vidak A., et al. Augmented Reality Technology in Teaching about Physics: A Systematic Review of Opportunities and Challenges, *European Journal of Physics*, 2024, vol. 45, no. 2, art. no. 023002. DOI: 10.1088/1361-6404/ad0e84
4. Arymbekov B. S., Turekhanova K. M. Augmented Reality in Physics Education: A Tool for Intellectual Learning, *Contemporary Educational Researches Journal*, 2025, vol. 15, iss. 1, pp. 33–44. DOI: 10.18844/cej.v15i1.9629
5. Suslova I. B. Tsifrovyye tekhnologii v prepodavanii i obuchenii: novyye resursy i transformatsiya pedagogicheskikh metodik [Digital Technologies in Teaching and Learning: New Resources and Transformation of Pedagogical Methods], *Vestnik Universiteta Rossiyskogo innovatsionnogo obrazovaniya [Bulletin of the University of Russian Innovative Education]*, 2024, no. 4, pp. 27–42. DOI: 10.24412/3034-3445-2024-4-27-42 (In Russian)
6. Poklonsky N. A., et al. Issledovanie perekhodnykh protsessov v poluprovodnikovykh strukturakh: posobie [Investigation of Transient Processes in Semiconductor Structures: A Manual]. Minsk, Belarusian State University, 2009, 103 p. (In Russian)
7. Lubimsky V. M. Model provodimosti polikristallicheskogo kremniya p-tipa, uchityvayushchaya rastekanie toka v kristallitakh [A Model of Conductivity of p-Type Polycrystalline Silicon Considering the Distribution of the Current in Crystallites], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2006, vol. 40, iss. 3, pp. 307–313 (In Russian)
8. Simon J. Augmented Reality Application Development Using Unity and Vuforia, *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 2023, vol. 21, iss. 1, pp. 69–77. DOI: 10.7906/indcs.21.1.6
9. Shevlyakov M. A., Khvorov R. A. 3D modelirovanie v obrazovatelnom protsesse vuza [3D Modeling in the Educational Process of the University], *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy: materialy 9-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Fire Safety: Problems and Prospects: Proceedings of the 9th All Russian Scientific and Practical Conference]*, Voronezh, Russia, June 12–16, 2018. Voronezh, Voronezh Institute — Branch of the Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of the EMERCOM of Russia, 2018, pp. 216–218. (In Russian)
10. Bayandin D. V. Klassifikatsiya interaktivnykh kompyuternykh modeley i struktura protsessa poznaniya v fizike [The Interactive Computer Models' Classification and the Structure of Natural Science Knowledge], *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education]*, 2013, no. 2, 8 p. (In Russian)
11. Linowes J. Augmented Reality with Unity AR Foundation: A Practical Guide to Cross-Platform AR Development with Unity 2020 and Later Versions. Birmingham, Packt Publishing, 2021, 382 p.

Received: June 22, 2026

Accepted: August 25, 2026

УДК 004.42:004.774:004.67

Реконструкция межсервисных отношений по трассировочным данным

**Забродин Андрей
Владимирович**

— кандидат ист. наук, доцент. Доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, аналитика данных, парадигмы программирования, микросервисная архитектура, облачные технологии.
E-mail: zabrodin@pgups.ru

**Хонина Ольга
Игоревна**

— ассистент кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, веб-разработка, парадигмы программирования.
E-mail: olga.khonina.0311@mail.ru

**Фадхутдинов Кирилл
Эдуардович**

— студент 3-го курса бакалавриата направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Научные интересы: информационные системы, веб-разработка.
E-mail: shiroasuri@gmail.com

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Забродин А. В., Хонина О. И., Фадхутдинов К. Э. Реконструкция межсервисных отношений по трассировочным данным // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 3 (47). С. 63–71. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-63-71

Аннотация. Рассматривается проблема перехода от анализа отдельной распределенной трассы к характеристикам межсервисных отношений, которые не содержатся в завершенном виде в одном выполнении и выявляются при сопоставлении множества трассировочных наблюдений. **Цель:** формализовать способ реконструкции межсервисных отношений по совокупности трассировочных данных и проверить его реализуемость на программном прототипе. **Методы:** выделение межсервисных вызовов из распределенных трасс, объединение однотипных наблюдений по идентифицирующему ключу, расчет характеристик соответствующих отношений и их представление в ориентированном атрибутированном графе. **Результаты:** отдельные вызовы представлены как реализация межсервисных взаимодействий, а характеристики отношений определяются по совокупности таких реализаций. Предложенная процедура реализована в программном прототипе и проверена на синтетических трассировочных данных микросервисной системы из пяти компонентов в сценариях штатной работы, повышенной задержки и ошибочных вызовов. Эксперимент показал воспроизводимость предусмотренного формализацией соответствия между изменениями отдельных наблюдений и характеристиками реконструируемых межсервисных отношений. **Практическая значимость:** получаемая графовая модель позволяет соотнести характеристики, отсутствующие в завершенном виде в отдельной трассе, с конкретными сервисами и направлениями их взаимодействия.

Ключевые слова: распределенная трассировка, микросервисная архитектура, межсервисные отношения, графовая модель, наблюдаемость, OpenTelemetry, трассировочные данные, системное представление, реконструкция взаимодействий

2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

Введение

В распределенной системе поведение запроса распадается на последовательность локальных операций, ни одна из которых не содержит целостного знания о выполнении. Распределенная трассировка преодолевает эту фрагментарность, связывая операции разных сервисов в единую причинно-временную структуру [1, 2]. Однако целостность, которую дает трасса, ограничена рамками одного выполнения. Маршрут запроса, длительность отдельных операций, место возникновения ошибки прослеживаются внутри нее [3], но поведение системы на интервале наблюдения — предмет иного рода: частота взаимодействий, доля ошибок, характер и распределение задержек не принадлежат ни одной отдельной трассе в завершенном виде и обнаруживаются лишь при сопоставлении ряда выполнений.

С переходом к интервалу наблюдения меняется и единица анализа. Отдельный вызов рассматривается уже как реализация межсервисного взаимодействия, повторяющегося от трассы к трассе. Чтобы определить характеристики такого взаимодействия, однотипные вызовы необходимо объединить по признакам, позволяющим отнести их к одному отношению. Характеристики отношения рассчитываются по совокупности зарегистрированных реализаций.

В существующих исследованиях трассировочные данные используются для получения сервисных метрик и графов зависимостей [4], а также для агрегированного анализа множества распределенных трасс [5, 6]. Для данной работы существенно не само агрегирование наблюдений, а то, к какому объекту относятся полученные характеристики. В предлагаемой модели таким объектом служит межсервисное отношение, реконструируемое по совокупности однотипных вызовов.

Реконструировать отношение и определить его характеристики недостаточно: результат необходимо соотнести с элементами системы, участвующими во взаимодействии. Для этого используется ориентированный атрибутированный граф, локализирующий реконструированное знание относительно конкретных сервисов и направлений взаимодействия.

Научная новизна работы состоит в формализации перехода от единичных трассировочных наблюдений к межсервисным отношениям как самостоятельным объектам системного уровня и в представлении их реконструированных характеристик в ориентированной атрибутированной графовой модели. Цель исследования — экспериментально проверить предложенный способ реконструкции. Авторы исходят из гипотезы, что характеристики межсервисного отношения, которых нет в завершенном виде ни в одной трассе, можно реконструировать, сопоставив множество трассировочных наблюдений и соотнеся их с элементами графовой модели. Для проверки реализован программный прототип, переводящий отдельные наблюдения в системное представление, и поставлен эксперимент на синтетических данных микро-сервисной системы.

От единичного выполнения к межсервисному отношению

Переход от анализа отдельной трассы к сопоставлению множества выполнений уже используется в ряде подходов к исследованию распределенных систем. В [4] трассировочные данные рассматриваются как источник сервисных метрик, графов зависимостей и рабочих потоков. В [5] множество распределенных трасс используется для агрегированного визуального анализа. В TraVista агрегированная информация, напротив, служит дополнительным контекстом при интерпретации конкретной трассы [6]. Несмотря на различие задач, эти подходы показывают, что характеристики системного уровня могут быть получены при сопоставлении данных нескольких выполнений.

Для решаемой задачи существенен вопрос о том, к какому объекту относятся характеристики, полученные при таком сопоставлении. Частота вызовов, доля ошибок и характеристики задержек описывают уже не отдельное выполнение, а повторяющееся взаимодействие между сервисами. Таким объектом в предлагаемой модели является межсервисное отношение. Каждый зарегистрированный вызов рассматривается как одна его реализация,

а совокупность однотипных вызовов служит основанием для определения характеристик отношения.

Выделение межсервисного отношения как объекта реконструкции позволяет отделить получение системного представления от его последующей диагностической интерпретации. Прежде чем анализировать задержки, ошибки или другие отклонения, необходимо определить объект, относительно которого они вообще могут быть зафиксированы. Поэтому способ реконструкции отношения не связывается с конкретным методом диагностики: сначала по множеству наблюдений восстанавливаются само отношение и его характеристики, а уже затем они могут использоваться для анализа поведения системы.

Графовое представление межсервисных взаимодействий само по себе не является новым. Например, Kialí на основе телеметрии Istio строит граф наблюдаемого трафика, отображающий интенсивность запросов, задержки и состояние связей между компонентами [7]. В данной работе существенен другой аспект — происхождение представленных в графе ребер и их характеристик. Каждое ребро соответствует межсервисному отношению, реконструированному по множеству однотипных вызовов, а его атрибуты получают значения из совокупности относящихся к этому взаимодействию наблюдений.

Формализация реконструкции межсервисных отношений

Реконструкция межсервисных отношений по трассировочным данным предполагает выделение среди зарегистрированных вызовов тех, которые относятся к одному взаимодействию. Для этого необходимо задать правило такого отнесения и определить характеристики, вычисляемые по совокупности соответствующих наблюдений. Исходной единицей анализа будем считать наблюдение o_i — направленный вызов между двумя сервисами в рамках конкретного распределенного выполнения:

$$o_i = (s_i, d_i, a_i, \tau_i, q_i, \dots),$$

где s_i — сервис-источник;

d_i — сервис-получатель;

a_i — тип операции;

τ_i — задержка;

q_i — статус завершения вызова.

Первые признаки позволяют идентифицировать взаимодействие, остальные описывают его конкретную реализацию.

При выбранном уровне детализации взаимодействия задается ключом

$$K(o_i) = (s_i, d_i, a_i).$$

Если тип операции для решаемой задачи несущественен, используется более общий ключ:

$$K(o_i) = (s_i, d_i).$$

Таким образом, состав ключа определяет, какие вызовы будут рассматриваться как реализации одного межсервисного отношения.

Пусть

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\} —$$

множество наблюдений, полученных из выбранного массива трасс. Для каждого значения ключа k выделяется подмножество

$$R_k = \{o_i \in O \mid K(o_i) = k\}.$$

Оно объединяет зарегистрированные реализации одного взаимодействия и служит основанием для реконструкции соответствующего межсервисного отношения.

Набор таких характеристик обозначим как

$$A(R_k) = \langle n_k \mid \text{error_rate}_k \mid \text{latency_stats}_k \mid \dots \rangle,$$

где n_k — число зарегистрированных вызовов;

error_rate_k — доля завершившихся с ошибкой, %;

latency_stats_k — статистические характеристики распределения задержек.

Конкретный состав показателей определяется задачей анализа.

Результат представляется ориентированным атрибутированным графом $G = (V, E)$, где вершины V соответствуют сервисам, а каждое ребро $e_k \in E$ — реконструированному межсервисному отношению. Значения $A(R_k)$ записываются в атрибуты соответствующего ребра. Если тип операции включен в ключ, между одной парой сервисов могут быть представлены несколько различных отношений.

Состав реконструированного графа определяется исходными трассировочными наблюдениями. Временной интервал, набор сервисов и полнота трассировки определяют, какие взаимодействия будут в нем представлены и на основании какого числа реализаций будут рассчитаны их характеристики [8]. Поэтому отсутствие ребра свидетельствует только о том, что соответствующее взаимодействие не наблюдалось в рассматриваемом массиве данных. Оно не означает, что такое взаимодействие в системе невозможно. По этой же причине реконструированный граф не следует отождествлять с архитектурной схемой: последняя задает предусмотренные компоненты и допустимые связи; граф же отражает взаимодействия, фактически зарегистрированные в выбранном интервале. Не заменяет он и отдельную трассу: трасса описывает конкретное выполнение, граф — отношения, реконструированные по множеству таких выполнений.

Для проверки предложенного способа реконструкции разработан программный прототип [9], воспроизводящий описанный переход от трассировочных наблюдений к межсервисным отношениям и их характеристикам. Его задача состоит не в воспроизведении отдельной системы наблюдаемости, а в обеспечении перехода от трассировочных данных к множеству межсервисных отношений и рассчитанным для них характеристикам. Соответствие этапов реконструкции программным компонентам показано на рис. 1.

Программная реализация реконструкции межсервисных отношений

Исходные данные поступают в формате распределенных трасс, сформированных средствами OpenTelemetry [2] и переданных через OpenTelemetry Collector [10]. Контекст трассировки распространяется между сервисами в соответствии с W3C Trace Context [11], что позволяет связать операции, относящиеся к одному выполнению. На этапе обработки из трасс выделяются межсервисные вызовы, для них формируется идентифицирующий ключ, после чего однотипные наблюдения объединяются и используются для расчета характеристик соответствующих отношений.



Рис. 1. Соответствие этапов реконструкции межсервисных отношений и компонентов программного прототипа

Трассировочные данные в данной работе рассматриваются как исходные для последующей реконструкции межсервисных отношений. Их получение требует инструментирования сервисов и передачи контекста трассировки в служебных заголовках, а сформированные span-данные создают дополнительный поток телеметрии к OpenTelemetry Collector [2, 10, 11].

Объем этого потока определяется интенсивностью трассируемых вызовов и составом

регистрируемых данных и не является постоянной величиной. Его количественная оценка в эксперимент не включалась, поскольку исследование начиналось с уже сформированного массива трассировочных наблюдений.

На этапе обработки из трасс выделяются межсервисные вызовы, для них формируется идентифицирующий ключ, после чего однотипные наблюдения объединяются и используются для расчета характеристик соответствующих отношений.

Результат сохраняется в Neo4j [12] в виде ориентированного атрибутированного графа, структура которого определена в предыдущем разделе. Такое представление обеспечивает соответствие между формализованной процедурой реконструкции и структурой данных, используемой при последующем экспериментальном анализе.

REST API, реализованный на FastAPI, и аналитические запросы Cypher обеспечивают доступ к полученной модели, а интерфейс на Streamlit — ее визуализацию. Эти компоненты выполняют вспомогательную функцию: они дают доступ к результату реконструкции, но не определяют сам способ его получения.

Экспериментальная проверка реализуемости реконструкции межсервисных отношений

Эксперимент воспроизводил на программном прототипе переход, формализованный ранее, — от отдельных межсервисных вызовов к характеристикам отношений, рассчитанным по множеству их реализаций. Проверялось, отражаются ли изменения исходных наблюдений в тех характеристиках реконструированного отношения, с которыми они связаны. Задача эксперимента этим и ограничивалась; эффективность диагностики, точность обнаружения аномалий и сравнение с другими средствами трассировки не оценивались.

Проверка проводилась на тестовой распределенной системе из пяти микросервисов: *api-gateway* обеспечивал прием и маршрутизацию запросов, *order-service* — обработку заказов, *inventory-service* — работу с данными о наличии, *payment-service* — обработку платежей, *notification-service* — формирование уведомлений. Для нее фор-

мировались синтетические трассировочные данные, воспроизводившие три состояния: штатную работу, повышенную задержку и ошибочные вызовы. Аналогичная конфигурация использовалась ранее при испытаниях прототипа [9]. Синтетические данные позволяли заранее задавать изменения отдельных вызовов и затем проследить, как они отражаются после реконструкции межсервисных отношений.

Все наборы трасс обрабатывались одинаково, различался только состав исходных наблюдений. Из зарегистрированных операций выделялись межсервисные вызовы, относящиеся к одной паре сервисов, после чего их значения накапливались на соответствующем ребре графа. В реализации прототипа обобщенный набор $A(R_k)$ представлен тремя показателями: *total_calls* — число вызовов, *error_count* — число ошибочных вызовов и *avg_duration* — средняя длительность. Первый соответствует n_k , отношение *error_count* к *total_calls* задает долю ошибок, а *avg_duration* представляет одну из статистических характеристик задержки.

Штатный сценарий использовался как базовый. В сценарии повышенной задержки увеличивалась длительность части вызовов, в сценарии ошибок часть вызовов завершалась с ошибочным статусом. Сопоставление этих изменений с характеристиками соответствующих межсервисных отношений приведено в таблице.

Изменения, заданные на уровне отдельных вызовов, получили отражение в характеристиках соответствующих межсервисных отношений. При увеличении длительности менялось значение *avg_duration*, а появление ошибочных завершений увеличивало *error_count* на том ребре, к которому были отнесены соответствующие вызовы.

На рис. 2 этот результат показан схематически для двух измененных сценариев: повышенной задержки и ошибочных вызовов. Рассчитанные значения относятся к конкретным направлениям взаимодействия между сервисами и закрепляются за соответствующими ребрами графовой модели.

Проверка проводилась на синтетических данных и небольшой тестовой системе, поэтому ее

Таблица

Проверка реконструкции межсервисных отношений по трассировочным наблюдениям

Экспериментальный сценарий	Заданное изменение наблюдений	Проверяемое соответствие	Результат в графовой модели
Штатная работа	Специальное изменение не вводится	Формирование межсервисных отношений и их базовых характеристик	Сформированы ребра с накопленными характеристиками
Повышенная задержка	Часть вызовов имеет увеличенную длительность	Отражение изменения длительности в характеристике соответствующего отношения	Изменение средней длительности отражено в атрибуте соответствующего ребра
Ошибочные вызовы	Часть вызовов завершается с ошибкой	Накопление ошибок в характеристиках соответствующего отношения	Число ошибочных вызовов отражено в атрибуте соответствующего ребра

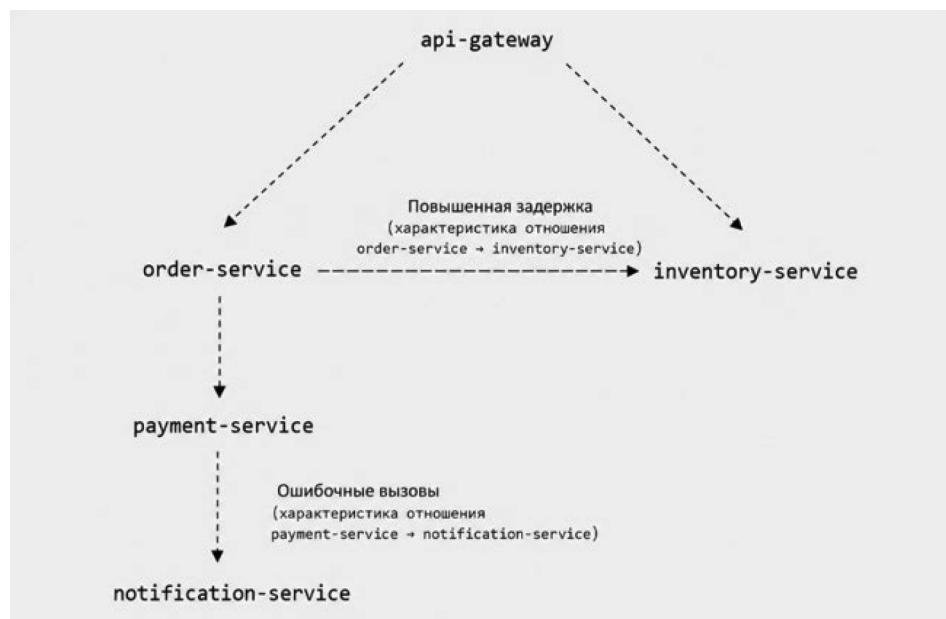


Рис. 2. Локализация характеристик реконструированных межсервисных отношений

результаты относятся только к контролируемым условиям эксперимента. Они подтверждают реализуемость предложенной процедуры, но не позволяют оценить устойчивость реконструируемых характеристик при изменчивой нагрузке, неполной трассировке или существенно большем числе взаимодействующих сервисов. Отдельной проверки требуют также влияние временного окна наблюдения и применение модели к производственным трассировочным данным.

Заключение

В работе формализован способ реконструкции межсервисных отношений по множеству трасси-

ровочных наблюдений. Однотипные вызовы объединяются по идентифицирующему ключу, после чего по их совокупности рассчитываются характеристики отношения. Полученные характеристики локализуются в ориентированной атрибутированной графовой модели относительно конкретных сервисов и направлений взаимодействия.

Программный прототип воспроизвел предложенную процедуру на синтетических трассировочных данных. В сценариях повышенной задержки и ошибочных вызовов изменения исходных наблюдений отразились в характеристиках соответствующих отношений, что подтвердило предусмотренное формализацией соответствие в контролируемых

условиях. Вопросы диагностической эффективности и точности обнаружения аномалий в эксперимент не входили.

Полученные результаты ограничены условиями проведенной проверки: использовались синтетические данные и небольшая тестовая система. Вопрос об устойчивости реконструируемых характеристик при изменчивой нагрузке, неполной трассировке

и большем числе взаимодействующих сервисов остается открытым; то же касается влияния временного окна наблюдения и перехода к производственным трассировочным данным. Отдельного исследования требует вопрос о том, при каком объеме и полноте наблюдений реконструируемые характеристики становятся достаточно устойчивыми для анализа поведения системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dapper, a Large-Scale Distributed Systems Tracing Infrastructure / B. H. Sigelman [et al.]. Google Technical Report. 2010. 14 p. URL: <http://research.google.com/pubs/archive/36356.pdf> (дата обращения: 05.08.2026).
2. Overview: OpenTelemetry Specification 1.60.0. URL: <http://opentelemetry.io/docs/specs/otel/overview> (дата обращения: 05.08.2026).
3. Leone J., Traini L. Enhancing Trace Visualizations for Microservices Performance Analysis // ICPE '23 Companion: Companion of the 2023 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering (Coimbra, Portugal, 15–19 April 2023). New York: Association for Computing Machinery, 2023. Pp. 283–287. DOI: 10.1145/3578245.3584729
4. Automated Analysis of Distributed Tracing: Challenges and Research Directions / A. Bento [et al.] // Journal of Grid Computing. 2021. Vol. 19, no. 1. Art. no. 9. 15 p. DOI: 10.1007/s10723-021-09551-5
5. Visualizing Distributed Traces in Aggregate / A. Samanta [et al.] // ArXiv. 2024. Vol. 2412.07036. 10 p. DOI: 10.48550/arXiv.2412.07036
6. Aggregate-Driven Trace Visualizations for Performance Debugging / V. Anand [et al.] // ArXiv. 2020. Vol. 2010.13681. 7 p. DOI: 10.48550/arXiv.2010.13681
7. Graph: Kiali Documentation. URL: <http://kiali.io/docs/faq/graph> (дата обращения: 06.08.2026).
8. So, You Want to Trace Your Distributed System? Key Design Insights from Years of Practical Experience / R. R. Sambasivan [et al.]. Technical Report CMU-PDL-14-102. Parallel Data Laboratory of the Carnegie Mellon University. 2014. 25 p. URL: <http://www.pdl.cmu.edu/ftp/SelfStar/CMU-PDL-14-102.pdf> (дата обращения: 06.08.2026).
9. Дьяченко Н. И. Визуализация транзакций между микросервисами в реальном времени на основе графовых технологий: магистерская диссертация. СПб.: ПГУПС, 2026. 110 с.
10. Collector: OpenTelemetry Documentation. URL: <http://opentelemetry.io/docs/collector> (дата обращения: 05.08.2026).
11. Trace Context. W3C Recommendation. 23 November 2021. URL: <http://www.w3.org/TR/trace-context> (дата обращения: 05.08.2026).
12. Graph Database Concepts: Neo4j Documentation. URL: <http://neo4j.com/docs/getting-started/appendix/graphdb-concepts> (дата обращения: 05.08.2026).

Дата поступления: 24.08.2026

Решение о публикации: 29.08.2026

Reconstruction of Interservice Relationships from Tracing Data

- Andrey V. Zabrodin** — PhD in History, Associate Professor. Associate Professor of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: information systems, data analytics, programming paradigms, microservice architecture, cloud technologies. E-mail: zabrodin@pgups.ru
- Olga I. Khonina** — Assistant Lecturer of the “Information and Computing Systems” Department. Research interests: information systems, web development, programming paradigms. E-mail: olga.khonina.0311@mail.ru
- Kirill E. Fadkhutdinov** — 3rd-year Bachelor’s Degree Student in 09.03.01 Informatics and Computer Technology. Research interests: information systems, web development. E-mail: shiroasuri@gmail.com

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Zabrodin A. V., Khonina O. I., Fadkhutdinov K. E. Reconstruction of Interservice Relationships from Tracing Data, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 3 (47), pp. 63–71. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-63-71 (In Russian)

Abstract. *The problem of moving from the analysis of an individual distributed trace to the characteristics of interservice relationships is considered. Such characteristics are not available in a complete form within a single execution and can be identified only by comparing multiple tracing observations. **Objective:** to formalize a method for reconstructing interservice relationships from a set of tracing data and to verify its feasibility using a software prototype. **Methods:** extraction of interservice calls from distributed traces, grouping of similar observations by an identifying key, calculation of the characteristics of the corresponding relationships, and their representation in a directed attributed graph. **Results:** individual calls are represented as realizations of interservice interactions, while the characteristics of the relationships are determined from the aggregate set of such realizations. The proposed procedure was implemented in a software prototype and tested on synthetic tracing data from a five-component microservice system under normal operation, increased latency, and erroneous-call scenarios. The experiment demonstrated the reproducibility of the correspondence defined by the formalization between changes in individual observations and the characteristics of reconstructed interservice relationships. **Practical significance:** the resulting graph model makes it possible to associate characteristics that are not available in a complete form within a single trace with specific services and directions of interaction.*

Keywords: *distributed tracing, microservice architecture, interservice relationships, graph model, observability, OpenTelemetry, tracing data, system-level representation, interaction reconstruction*

REFERENCES

1. Sigelman B. H., et al. Dapper, a Large-Scale Distributed Systems Tracing Infrastructure. Google Technical Report, 2010, 14 p. Available at: <http://research.google.com/pubs/archive/36356.pdf> (accessed: August 05, 2026).
2. Overview: OpenTelemetry Specification 1.60.0. Available at: <http://opentelemetry.io/docs/specs/otel/overview> (accessed: August 05, 2026).
3. Leone J., Traini L. Enhancing Trace Visualizations for Microservices Performance Analysis, *ICPE ‘23 Companion: Companion of the 2023 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering*, Coimbra, Portugal, April 15–19, 2023. New York, Association for Computing Machinery, 2023, pp. 283–287. DOI: 10.1145/3578245.3584729
4. Bento A., et al. Automated Analysis of Distributed Tracing: Challenges and Research Directions, *Journal of Grid Computing*, 2021, vol. 19, no. 1, art. no. 9, 15 p. DOI: 10.1007/s10723-021-09551-5

5. Samanta A., et al. Visualizing Distributed Traces in Aggregate, *ArXiv*, 2024, vol. 2412.07036, 10 p. DOI: 10.48550/arXiv.2412.07036
6. Anand V., et al. Aggregate-Driven Trace Visualizations for Performance Debugging, *ArXiv*, 2020, vol. 2010.13681, 7 p. DOI: 10.48550/arXiv.2010.13681
7. Graph: Kiali Documentation. Available at: <http://kiali.io/docs/faq/graph> (accessed: August 06, 2026).
8. Sambasivan R. R., et al. So, You Want to Trace Your Distributed System? Key Design Insights from Years of Practical Experience. Technical Report CMU-PDL-14-102. Parallel Data Laboratory of the Carnegie Mellon University, 2014, 25 p. Available at: <http://www.pdl.cmu.edu/ftp/SelfStar/CMU-PDL-14-102.pdf> (accessed: August 06, 2026).
9. Dyachenko N. I. Vizualizatsiya tranzaktsiy mezhdu mikroservisami v realnom vremeni na osnove grafovyykh tekhnologiy [Visualization of Transactions between Microservices in Real Time Based on Graph Technologies]: Master's Degree Thesis. Saint Petersburg, PSTU, 2026, 110 p. (In Russian)
10. Collector: OpenTelemetry Documentation. Available at: <http://opentelemetry.io/docs/collector> (accessed: August 05, 2026).
11. Trace Context. W3C Recommendation. 23 November 2021. Available at: <http://www.w3.org/TR/trace-context> (accessed: August 05, 2026).
12. Graph Database Concepts: Neo4j Documentation. Available at: <http://neo4j.com/docs/getting-started/appendix/graphdb-concepts> (accessed: August 05, 2026).

Received: August 24, 2026

Accepted: August 29, 2026

УДК 314.3:51

Математическое моделирование и прогнозирование динамики демографии в Российской Федерации в XXI веке

**Герасименко Петр
Васильевич**

— доктор техн. наук, профессор. Профессор кафедры «Экономика и менеджмент в строительстве». Научные интересы: эконометрика, математика, применение математических методов в экономике, механика упругих систем, учебный процесс в школе и вузе.
E-mail: pv39@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Герасименко П. В. Математическое моделирование и прогнозирование динамики демографии в Российской Федерации в XXI веке // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 3 (47). С. 72–81. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-72-81

Аннотация. *Выполнено математическое моделирование и краткосрочное прогнозирование количества рожденных детей в Российской Федерации в XXI веке. Цель:* обеспечение информационной поддержки при принятии решений по социальным проблемам. **Методы:** моделирование осуществлено с помощью линейных функций. Построение математических моделей выполнено с помощью временных рядов и регрессионного анализа, в качестве инструмента использована «Регрессия» пакета анализа MS Excel. **Результаты:** процесс моделирования, базирующийся на статистических данных и традиционных математических вероятностно-статистических методах, позволил проводить качественное краткосрочное прогнозирование. Для временных рядов использованы статистические данные Росстата, охватывающие период с 1992 по 2024 год. Верификация модели осуществлена по количеству детей, рожденных в 2025 году. Качество построенной модели оценено с помощью погрешности аппроксимации, коэффициентов корреляции и детерминации, величины статистики Фишера, а также верификации. **Практическая значимость:** заключается в проведении сравнительного анализа числа рождений детей в конце текущего десятилетия и за аналогичный период в начале XXI столетия, что позволяет подтвердить критическую демографическую ситуацию в РФ в настоящее время.

Ключевые слова: демография, модель, точечное и интервальное прогнозирование, вероятность, возраст, рождение детей

1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

Введение

На протяжении последних десятилетий перед Россией стоит комплекс демографических проблем, включая падение рождаемости, высокую смертность, эмиграцию квалифицированных кадров, старение возрастной структуры населения и усиление миграционного давления. В ряде ра-

бот, в том числе в [1], проведен точечный прогноз рождаемости в РФ до 2026 года. В ней показано, что в период с 2023 по 2026 год число родившихся в России детей продолжало сокращаться, причем оно снизилось до минимума по сравнению с 1999 годом.

Как отмечают эксперты, это снижение является отражением существовавшего с 1992 по 1999 год процесса, а следовательно, современная демографическая ситуация в РФ по-прежнему является одной из самых острых и сложных социальных проблем, требующих решения.

Анализ состояния динамики демографии в Российской Федерации в XXI веке

Справедливость приведенного во введении утверждения видна из рис. 1, где представлена динамика демографии в России в период с 1992 по 2024 год.

Согласно прогнозным оценкам Социального фонда России, динамика рождаемости в последние годы характеризуется следующими показателями [1]: в 2023 году родилось 1,245 млн детей (это минимальное значение с 1999 года, когда было зафиксировано 1,215 млн); в 2024 году — 1,172 млн (самый низкий показатель с начала 1990-х годов); в 2025 году — 1,153 млн. Прогноз на 2026 год составляет 1,143 млн. Следовательно, сокращение числа родившихся в 2024 году относительно предыдущего года достигло 5,8 %, а в 2025 году — 1,647 %.

По динамике ожидания предполагается, что в 2026 году темп снижения замедлится до 0,9 %. Вместе с тем снижение продолжится [1, 2]. Следует отметить, что, согласно официально опубликованным данным Росстата за 2024 год, в России родилось 1,222 млн младенцев [3].

Сегодня в стране средний коэффициент рождаемости равен 1,4. Такая величина является катастрофической для будущего нации, поскольку она крайне низка. По данным Росстата, по итогам 2023 года суммарный коэффициент рождаемости оказался худшим за 17 лет [4].

Как утверждает в демографическом долгосрочном прогнозе Росстата до 2046 года, который проводился с учетом результатов Всероссийской переписи населения в октябре — ноябре 2021 года, снижение рождаемости в РФ с 2023 по 2027 год продолжится, при этом в 2027-м суммарное количество рожденных детей составит 1140,4 тыс. Только начиная с 2028 года начнется рост числа младенцев, и к 2045 году рождаемость прогнозируется в размере 1426,2 тыс. [2].

Как следует из анализа характера изменения демографической ситуации в России в начале XXI века (рис. 1), ее динамика рождаемости носит

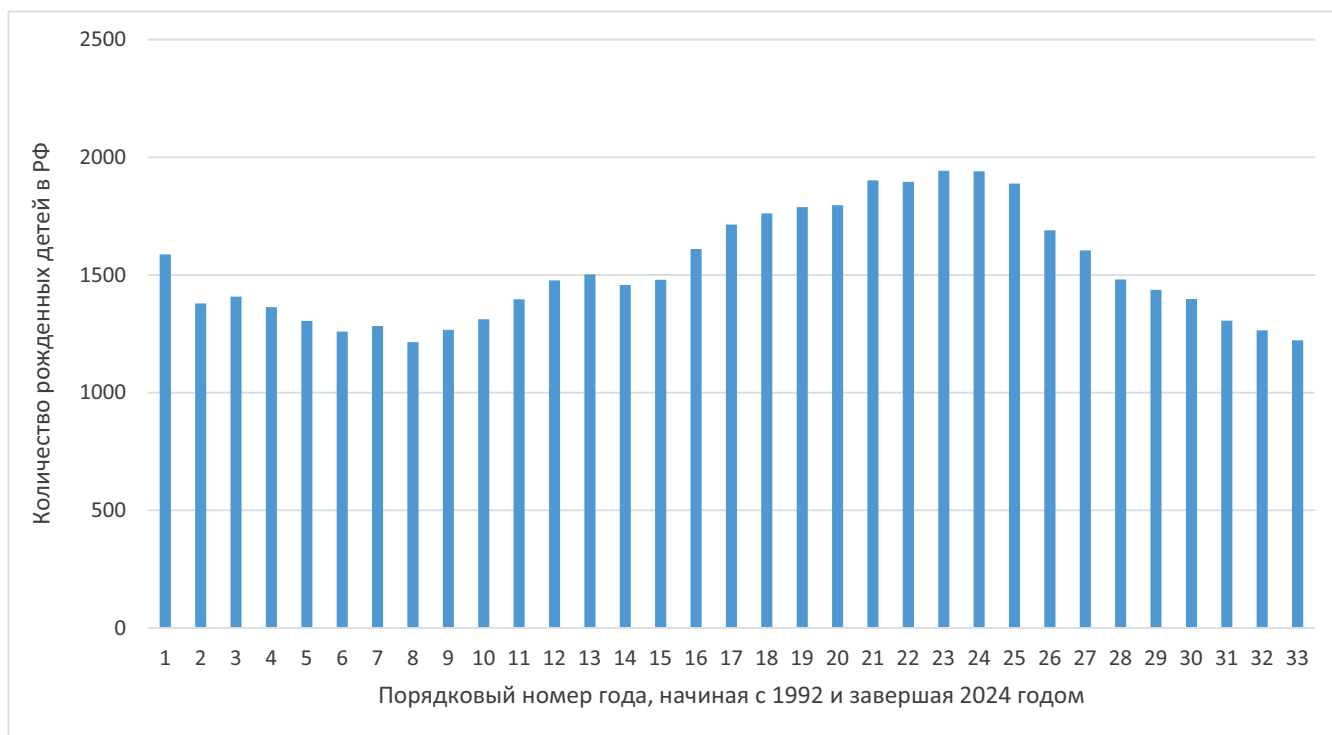


Рис. 1. Динамика рождаемости с 1992 по 2024 год

волновой характер с низкой амплитудой порядка от одного до двух миллионов детей [5].

Ряд исследователей предполагают, что с определенной вероятностью до сих пор на демографии сказывается влияние Великой Отечественной войны [6]. Сформировавшаяся динамика во многом обусловлена сокращением контингента женщин, находящихся в наиболее активном репродуктивном периоде — от 20 до 29 лет (на данную возрастную группу приходится свыше 50% всех рождений), а также переносом сроков рождения первенца на более поздний возраст из-за экономической нестабильности [3].

Кроме того, существенный вклад в ухудшение демографической обстановки внесла пандемия COVID-19, которая привела, с одной стороны, к отсрочке репродуктивных планов, а с другой — к финансовым затруднениям из-за потери занятости и падения доходов, а также к тревожности относительно дальнейших перспектив [7]. Указанные факторы побуждали молодые супружеские пары воздерживаться от расширения семьи.

Моделирование динамики демографии в Российской Федерации в XXI веке

Приведенные причины послужили основанием для проведения исследования. Его целью было построение более точного краткосрочного прогноза — с временным горизонтом до 2028 года.

Следует отметить, что до настоящего времени как краткосрочные, так и долгосрочные прогнозы демографической динамики носили детерминированный точечный характер [8]. Поскольку реальные процессы всегда имеют случайную природу, в работе оценка прогнозов выполнена с использованием как точечных, так и интервальных значений [9].

Кроме того, с учетом особенностей демографической ситуации в Российской Федерации в XXI веке прогнозы разделены на три этапа. Данная периодизация опирается на общую динамику, представленную на рис. 1, а также на данные о количестве рождений в разные годы, приведенные в табл. 1.

При принятом разбиении каждый из этапов представляет часть волнового монотонного

Таблица 1

Статистические данные количества рожденных в РФ по годам и этапам

Первый этап									
Порядковый номер	1	2	3	4	5	6	7	8	
Год	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	
Количество, тыс. чел.	1587,6	1379,0	1408,2	1363,8	1304,6	1259,9	1283,3	1214,7	
Второй этап									
Порядковый номер	1	2	3	4	5	6	7	8	
Год	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	
Количество, тыс. чел.	1266,8	1311,6	1397,0	1477,3	1502,5	1457,4	1479,6	1610,1	
Порядковый номер	9	10	11	12	13	14	15	16	
Год	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
Количество, тыс. чел.	1713,9	1761,7	1788,9	1796,6	1902,1	1895,8	1942,7	1940,6	
Третий этап									
Порядковый номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Год	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Количество, тыс. чел.	1888,7	1690,3	1604,3	1481,1	1436,5	1398,3	1306,2	1264,9	1222,4

изменения, то есть возрастания или убывания. На основании статистических данных, представленных в табл. 1, для каждого этапа построены парные линейные математические модели [10], графическое представление которых дано на рис. 2.

Построение парных линейных регрессий выполнено с помощью инструмента «Регрессия» из пакета анализа MS Excel на основе статистических данных для каждого из выделенных этапов (см. табл. 1).

Применение этого инструмента позволило:

- рассчитать выборочные коэффициенты корреляции и детерминации, а также стандартное отклонение;

- разложить общую сумму квадратов на объясненную и остаточную компоненты;
- определить расчетное значение F -критерия и соответствующий уровень значимости;
- получить оценки регрессионных параметров, их стандартные погрешности и t -статистики;
- вычислить расчетные (теоретические) значения результативного признака, а также остатки и построить их графики;
- сформировать ряд других статистических оценок.

Некоторые полученные значения для каждого этапа представлены в табл. 2–4.

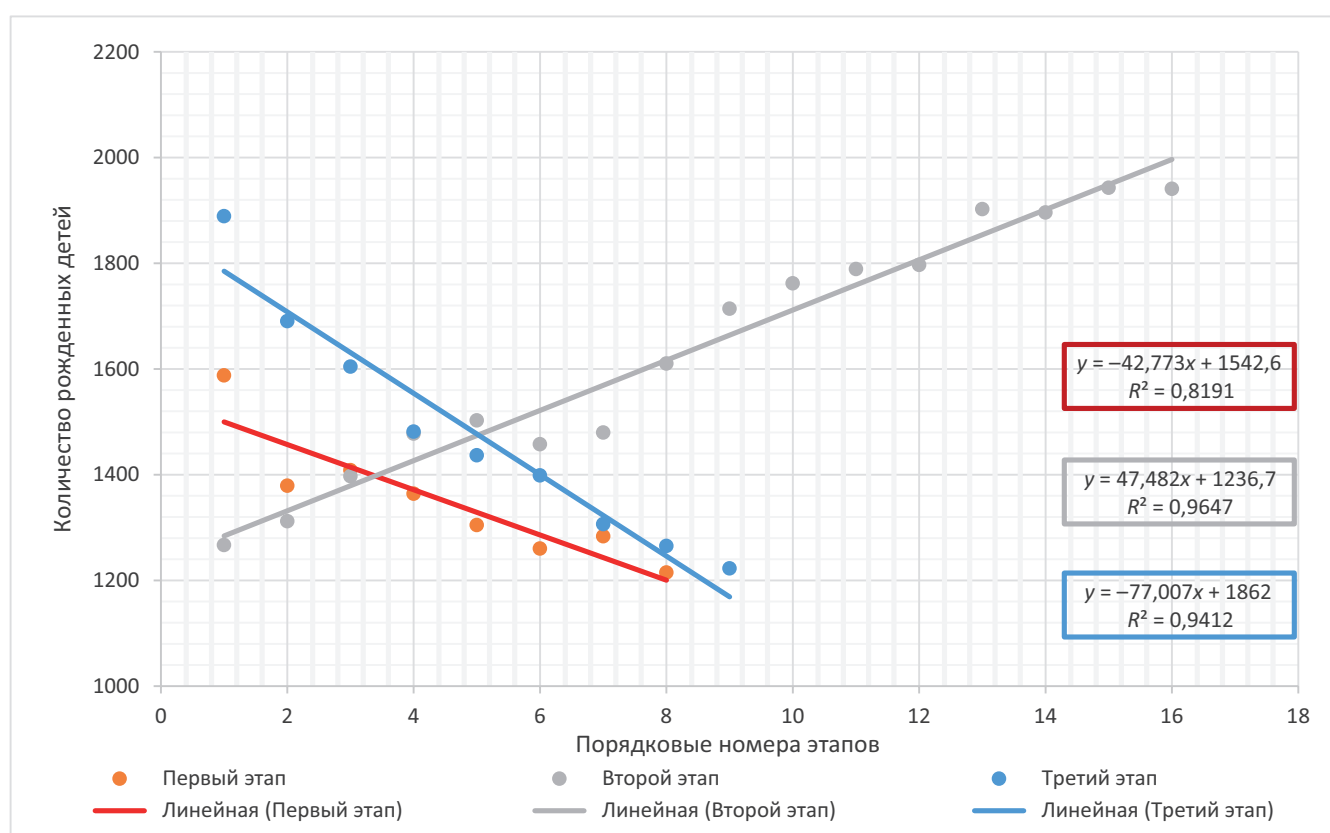


Рис. 2. Графики, аналитические зависимости и коэффициенты детерминации моделей трех этапов

Таблица 2

Регрессионная статистика

Этап	Множественный R	R-квадрат	Нормированный R-квадрат	Стандартная ошибка
Первый	0,905	0,819	0,789	53,180
Второй	0,980	0,964	0,960	44,770
Третий	0,970	0,940	0,930	0,960

Таблица 3

Дисперсионный анализ

Этапы	Коэффициенты при факторе	<i>t</i> -статистика	<i>P</i> -Значение	Критерий <i>F</i>	Значимость <i>F</i>
Первый	–42,77	5,295	0,002	27,17	0,0019
Второй	47,48	19,560	1,450	382,40	1,46E-11
Третий	–77,00	7,270	1,400	112,00	1,4E-05

Таблица 4

Относительные погрешности аппроксимации

Этапы	Размер погрешности моделей по этапам, %		
	Максимальный	Минимальный	Средний
Первый	5,66	0,43	2,55
Второй	6,05	0,30	2,15
Третий	5,49	0,12	2,58

Оценка качества регрессионных зависимостей выполнена прежде всего с применением коэффициента детерминации (табл. 2). Значения данного показателя свидетельствуют о том, что степень тесноты связи между числом родившихся и временным фактором (годом) характеризуется величинами 81,9% для первого этапа, 96,4% — для второго и 94,0% — для третьего.

Анализ погрешностей аппроксимации продемонстрировал, что наибольшая ошибка не превысила 6,05%. Вычисление интегральных погрешностных характеристик и норм подтвердило приемлемое качество разработанных моделей. Проверка по критерию Фишера дала основания отвергнуть нулевую гипотезу о случайном характере коэффициента регрессии для всех трех моделей, что позволяет принять альтернативную гипотезу о статистической значимости каждого из полученных уравнений.

Если фактическое (расчетное) значение *F*-статистики Фишера превышает табличное при заданном уровне значимости и числах степеней свободы 1 и $n - 2$, то нулевая гипотеза о статистической ненадежности регрессионной модели отвергается.

Анализ величин параметров, представленных в табл. 2–4, показывает, что построенные регресси-

онные математические модели могут служить основой для проведения точечного и интервального прогнозирования динамики рождения детей в РФ в XXI веке.

Следует отметить, что в табл. 3 в третьем временном периоде происходит более сильное снижение количества рождаемых детей по сравнению с первым периодом. Об этом свидетельствуют значения коэффициентов, которые представляют величины тангенса угла наклона прямой линии. Для первого периода он равен –42,77, а для третьего практически в два раза больше по абсолютной величине. Благодаря этому, как показано на рис. 3, отношение количества рожденных детей в первом периоде к количеству в третьем растет. Причем при сравнении количества 1992 года с количеством 2024-го достигает величины больше единицы.

Это обстоятельство указывает на то, что существующие жизненные условия для молодых людей в настоящее время не благоприятствуют увеличению семьи. Необходимо, чтобы они были аналогичны хотя бы концу прошлого столетия.

Анализ величин параметров, представленных в табл. 1–3, показывает, что построенные регрессионные математические модели могут служить основой для проведения точечного и интервального прогнозирования динамики демографии.

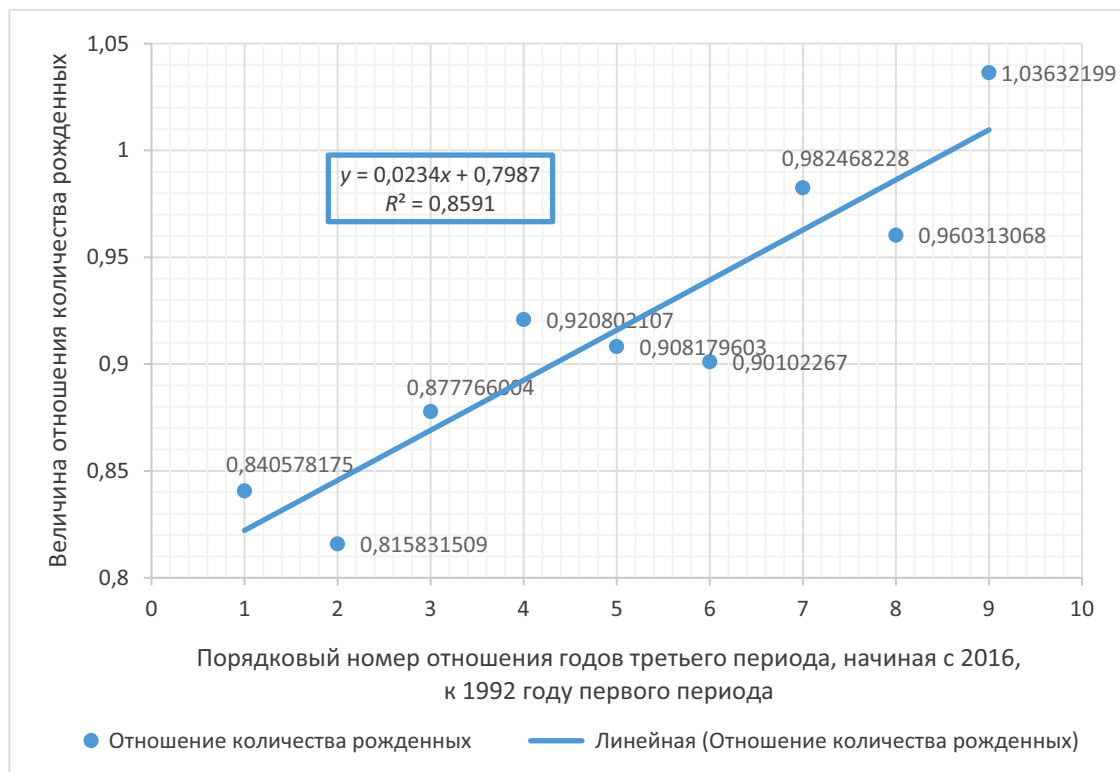


Рис. 3. Регрессионная зависимость отношения количества рожденных в первом периоде к их числу в третьем периоде по годам

Прогнозирование динамики демографии в Российской Федерации в XXI веке

Как отмечалось ранее, для получения более обоснованных выводов по прогнозам в работе учтена случайная природа демографических процессов — с помощью интервального прогнозирования. Такой подход позволяет оценить риски недостижения плановых показателей рождаемости [10].

Для вычисления прогнозного интервала количества рожденных $y(x_p)$ в каждом прогнозируемом году третьего периода начиная с 2025-го применяется соответствующее уравнение регрессии, графически представленное на рис. 3. На его основе вычисляется прогнозируемое среднее значение числа родившихся для каждого года. Данная оценка носит характер точечного прогноза, так как соответствует математическому ожиданию и изображается единственной точкой на числовой шкале. Однако точечный прогноз неизбежно содержит погрешность, поскольку сама прогнозируемая величина является случайной и характеризуется определенной дисперсией. Более обоснованным является подход, основанный на интервальном оценивании [11]. В этом

случае точечный расчет зависимой переменной дополняется интервальной оценкой прогнозируемого среднего значения, которая записывается следующим образом [12]:

$$y(x_p) - m_{\hat{y}_p} \leq Y^* \leq y(x_p) + m_{\hat{y}_p},$$

где $m_{\hat{y}_p} = t_{1-\alpha, n-2} \cdot S_{x_p}$.

В приведенном выражении $t_{1-\alpha, n-2}$ представляет собой табличное значение t -критерия Стьюдента при $(n - 2)$ степенях свободы и заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$;

$$S_{x_p} = S_e \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{x} - x_p)^2}{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}}$$

оценка среднеквадратического отклонения (стандартная ошибка),

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}(T))^2}$$

квадратный корень из остаточной суммы квадратов отклонений фактических значений от расчетных.

На основании выполненных расчетов по приведенным соотношениям в табл. 5 представлены результаты точечного и интервального прогнозирования количества рожденных детей в стране.

Таблица 5

Показатели интервального прогнозирования

Год рождения	2025	2026	2027	2028
Нижнее значение доверительного интервала	1030,73	950,13	869,12	787,76
Точечный прогноз	1091,90	1014,90	937,92	860,91
Верхнее значение доверительного интервала	1153,14	1079,72	1006,72	934,07

В табл. 5 приведены средние прогнозные и предельные значения доверительных интервалов [12]. Графическое их представление дано на рис. 4, из которого наглядно видно, в каком диапазоне сле-

дует ожидать с вероятностью 0,95 количества рожденных детей.

Следует отметить, что среди результатов прогноза приведены значения количества детей, родившихся в 2025 году, которые не участвовали в качестве исходных данных при прогнозировании, а были предназначены для верификации. Их величина, а именно 1153, находится в прогнозном интервале от нижнего интервального предела, равного 1030,73, до верхнего — 1222,4. Этот факт подтверждает удовлетворительное качество прогнозирования по последующим годам — с 2026-го по 2028-й.

Заключение

Необходимо отметить, что 2024 год был объявлен Президентом РФ Годом семьи, а в 2025-м было подписано распоряжение Правительства РФ об утверждении Стратегии действий по реализации семейной и демографической политики в России до 2036 года [13]. Как видно из исследования, радикальных изменений пока не наступает.

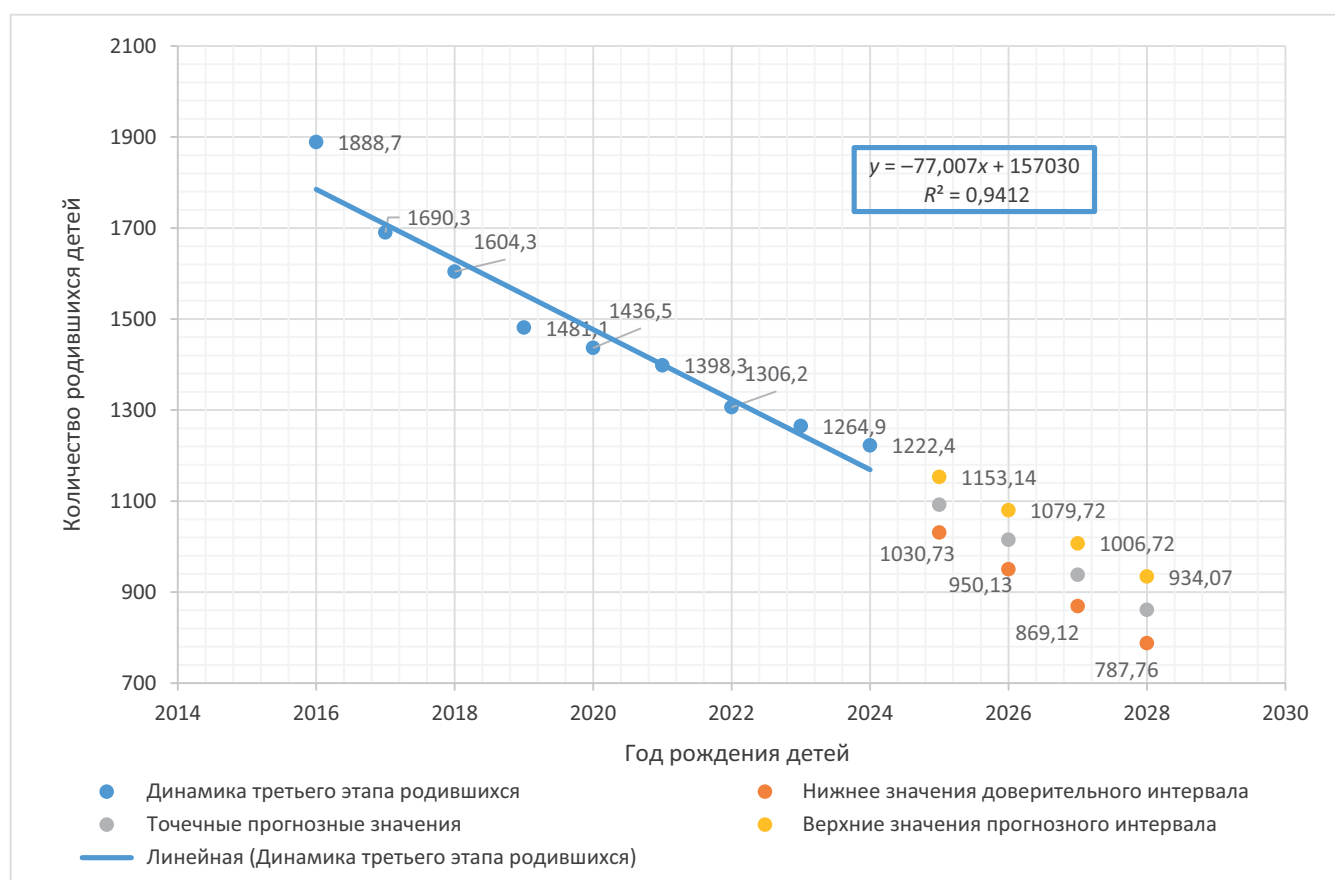


Рис. 4. Прогнозные количества рожденных по годам по точечному и интервальному прогнозам

Результаты проведенных исследований, учитывающие стохастический характер демографических процессов, не меняют общей картины динамики численности населения.

Анализ данных показывает: если не принять комплексные меры по решению социальных проблем, демографическая ситуация в Российской Федерации окажется в еще более плачевном состоянии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Виноградова Е. Власти оценили динамику рождаемости в России до 2026 года // РБК. 03.10.2023. URL: <http://www.rbc.ru/economics/03/10/2023/651a95509a7947addf136c31> (дата обращения: 01.04.2026).
2. Росстат опубликовал демографический прогноз до 2046 года // Федеральная служба государственной статистики (Росстат): официальный сайт. 10.10.2023. URL: <http://rosstat.gov.ru/folder/313/document/220709> (дата обращения: 12.03.2026).
3. Росстат представляет данные о естественном движении населения в декабре 2024 года // Федеральная служба государственной статистики (Росстат): официальный сайт. 21.02.2025. URL: <http://rosstat.gov.ru/folder/313/document/255130> (дата обращения: 12.03.2026).
4. Донской Д. А., Ужакова М. В. Анализ демографической ситуации в Российской Федерации. Прогноз на 2024–2026 гг. // ЭФО: Экономика. Финансы. Общество. 2024. № 4 (12) С. 51–61. DOI: 10.24412/2782-4845-2024-12-51-61
5. Суммарный коэффициент рождаемости в России по годам и субъектам // InfoTables.ru. URL: <http://infotables.ru/statistika/31-rossijskaya-federatsiya/1261-summarnyj-koeffitsient-rozhdaemosti> (дата обращения: 01.04.2026).
6. Ершова К. Статистика рождаемости в России // Т—Ж. 06.04.2026. URL: <http://t-j.ru/fertility-stat> (дата обращения: 14.04.2026).
7. Смирнова С. С. Анализ демографической ситуации в Российской Федерации за период 2018–2024 гг. / С. С. Смирнова; науч. рук. О. В. Родионова // Молодой ученый. 2026. № 3 (606). С. 198–201.
8. Медик В. А., Токмачев М. С. Математическая статистика в медицине: учебное пособие. М.: Финансы и статистика, 2007. 800 с.
9. Вадзинский Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям. СПб.: Наука, 2001. 295 с.
10. Герасименко П. В. Теория оценивания риска: учебное пособие. СПб.: ПГУПС, 2015. 51 с.
11. Герасименко П. В. Моделирование длительности жизни выдающихся ученых математиков, рожденных в период с 16-го по 20-е столетия // Математическое моделирование систем и процессов: сборник материалов Международной научно-практической конференции (Псков, Россия, 10–11 ноября 2022 г.). Псков: Псковский гос. ун-т, 2022. С. 158–164. DOI: 10.37490/978-5-00200-102-6-158-164
12. Герасименко П. В. Прогнозирования средней дальности перевозки одной тонны груза железнодорожным транспортом России // Основы экономики, управления и права. 2023. № 1(36). С. 38–42. DOI: 10.51608/23058641_2023_1_38
13. Об утверждении Стратегии действий по реализации семейной и демографической политики, поддержке многодетности в Российской Федерации до 2036 года: распоряжение Правительства РФ от 15 марта 2025 г. № 615-р.

Дата поступления: 30.08.2026

Решение о публикации: 31.08.2026

Mathematical Modeling and Forecasting of Demographic Dynamics in the Russian Federation in the XXI Century

Petr V. Gerasimenko — Dr. Sci. in Engineering, Full Professor. Professor of the “Economics and Management in Construction” Department. Research interests: econometrics, mathematics, application of mathematical methods in economics, mechanics of elastic systems, academic activity in schools and higher education. E-mail: pv39@mail.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Gerasimenko P. V. Mathematical Modeling and Forecasting of Demographic Dynamics in the Russian Federation in the XXI Century, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 3 (47), pp. 72–81. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-72-81 (In Russian)

Abstract. *Mathematical modeling and short-term forecasting of the number of children born in the Russian Federation in the XXI century have been carried out. **Purpose:** to meet a significant demand in decision-making practice related to addressing social issues. **Methods:** modeling was performed using linear functions. Mathematical models were constructed using time series and regression analysis; the “Regression” tool from the MS Excel analysis package was used. Results: the modeling process, based on statistical data and traditional mathematical probabilistic and statistical methods, made it possible to carry out high-quality short-term forecasting. For the time series, static data from Rosstat were used, covering the period from 1992 to 2024. The model was verified based on the number of children born in 2025. The quality of the constructed model was assessed using the approximation error, correlation and determination coefficients, the Fisher statistic value, and verification. **Practical significance:** lies in conducting a comparative analysis of the number of births at the end of the current decade and over the same period at the beginning of the 21st century, which confirms the current critical demographic situation in the Russian Federation.*

Keywords: *demography, model, point and interval forecasting, probability, age, birth rate*

REFERENCES

1. Vinogradova E. Vlasti otsenili dinamiku rozhdaemosti v Rossii do 2026 goda [The Authorities Estimated the Dynamics of the Birth Rate in Russia until 2026], *RBK*. Available at: <http://www.rbc.ru/economics/03/10/2023/651a95509a7947addf136c31> (accessed: April 01, 2026). (In Russian)
2. Rosstat opublikoval demograficheskiy prognoz do 2046 goda [Rosstat Has Published a Demographic Forecast until 2046], *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki (Rosstat) [Federal State Statistics Service (Rosstat)]*. Published online at October 10, 2023. Available at: <http://rosstat.gov.ru/folder/313/document/220709> (accessed: March 12, 2026). (In Russian)
3. Rosstat predstavlyaet dannye o estestvennom dvizhenii naseleniya v dekabre 2024 goda [Rosstat Presents Data on the Natural Movement of the Population in December 2024], *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki (Rosstat) [Federal State Statistics Service (Rosstat)]*. Published online at February 21, 2025. Available at: <http://rosstat.gov.ru/folder/313/document/255130> (accessed: March 12, 2026). (In Russian)
4. Donskoy D. A., Uzhakova M. V. Analiz demograficheskoy situatsii v Rossiyskoy Federatsii. Prognoz na 2024–2026 gg. [Analysis of the Demographic Situation in the Russian Federation. Forecast for 2024–2026], *EFO: Ekonomika. Finansy. Obshchestvo*, 2024, no. 4 (12), pp. 51–61. DOI: 10.24412/2782-4845-2024-12-51-61. (In Russian)

5. Summarnyy koeffitsient rozhdaemosti v Rossii po godam i subektam [The Total Fertility Rate in Russia by Year and Region], *InfoTables.ru*. Available at: <http://infotables.ru/statistika/31-rossijskaya-federatsiya/1261-summarnyj-koeffitsient-rozhdaemosti> (accessed: April 01, 2026). (In Russian)
6. Ershova K. Statistika rozhdaemosti v Rossii [Birth Rate Statistics in Russia], *T—Zh*. Published online at April 06, 2026. Available at: <http://t-j.ru/fertility-stat> (accessed: April 14, 2026). (In Russian)
7. Smirnova S. S. Analiz demograficheskoy situatsii v Rossiyskoy Federatsii za period 2018–2024 gg. [Analysis of the Demographic Situation in Russian Federation for the Period 2018–2024], *Molodoy uchenyy [Young Scientist]*, 2026, no. 3 (606), pp. 198–201. (In Russian)
8. Medik V. A., Tokmachev M. S. Matematicheskaya statistika v meditsine: uchebnoe posobie [Mathematical Statistics in Medicine: A Textbook]. Moscow, Publishing House Finance and Statistics, 2007, 800 p.
9. Vadzinsky R. N. Spravochnik po veroyatnostnym raspredeleniyam [Handbook of Probability Distributions]. Saint Petersburg, Nauka Publishers, 2001, 295 p. (In Russian)
10. Gerasimenko P. V. Teoriya otsenivaniya riska: uchebnoe posobie [Risk Assessment Theory: A Textbook]. Saint Petersburg, PSTU, 2015, 51 p. (In Russian)
11. Gerasimenko P. V. Modelirovanie dlitelnosti zhizni vydayushchikhsya uchenykh matematikov, rozhdennykh v period s 16-go po 20-e stoletiya [Modeling the Life Span of Outstanding Scientists and Mathematicians Born in the Period from the 16th to the 20th Centuries], *Matematicheskoe modelirovanie sistem i protsessov: sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Mathematical Modeling of System and Processes: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]*, Pskov, Russia, November 10–11, 2022. Pskov, Pskov State University, 2022, pp. 158–164. DOI: 10.37490/978-5-00200-102-6-158-164 (In Russian)
12. Gerasimenko P. V. Prognozirovaniya sredney dalnosti perevozki odnoy tonny gruzha zheleznodorozhnym transportom Rossii [Methodology of Forecasting the Average Range of Cargo Transportation by Rail Transport of Russia], *Osnovy ekonomiki, upravleniya i prava [Economy, Governance and Law Basis]*, 2023, no. 1 (36), pp. 38–42. DOI: 10.51608/23058641_2023_1_38 (In Russian)
13. Ob utverzhdenii Strategii deystviy po realizatsii semeynoy i demograficheskoy politiki, podderzhke mnogodetnosti v Rossiyskoy Federatsii do 2036 goda [Approval of the Action Strategy for the Implementation of Family and Demographic Policy, Support for Large Families in the Russian Federation until 2036]: Decree of the Government of the Russian Federation dated March 15, 2025 no. 615-r. (In Russian)

Received: August 30, 2026

Accepted: August 31, 2026

УДК 004.94:697.34

Анализ программных средств моделирования систем централизованного теплоснабжения

Утепбергенов Ирбулат Туремуратович — доктор техн. наук, профессор кафедры автоматизации и управления. Научные интересы: автоматизированные системы управления технологическими процессами, искусственный интеллект, автоматизация сбора и обработки данных научного эксперимента, транспорт. E-mail: i.utepbergenov@aes.kz

Сейтбекова Айнагуль Манарбековна — магистр, старший преподаватель кафедры кибербезопасности. Научные интересы: информационные системы, автоматизированные системы управления технологическими процессами, цифровые двойники в энергетике. E-mail: a.seitbekova@aes.kz

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Казахстан, 050013, Алматы, ул. Байтурсынулы, 126/1

Для цитирования: Утепбергенов И. Т., Сейтбекова А. М. Анализ программных средств моделирования систем централизованного теплоснабжения // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 3 (47). С. 82–92. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-82-92

Аннотация. Представлен обзор программных средств моделирования систем централизованного теплоснабжения для обоснованного выбора теплоснабжающими предприятиями оптимальных программных комплексов. **Цель:** систематизировать программные средства моделирования систем централизованного теплоснабжения (СЦТ), сопоставить реализованные в них математические подходы и определить границы применимости инструментов для проектирования, режимного анализа, модернизации, оптимального управления и создания цифровых двойников. **Методы:** многокритериальный сравнительный анализ по типу термогидравлической модели, временному и пространственному масштабу, составу оборудования, возможностям оптимизации, калибровки и интеграции с GIS/SCADA, API, FMI и OPC. **Результаты:** показана эффективность специализированных сетевых платформ для эксплуатации и режимных расчетов и Modelica-совместимых сред для детального динамического моделирования и разработки управления. **Практическая значимость:** возможность использования предложенных классификаций, сравнительных критериев и матрицы выбора исследования при цифровизации и поэтапной модернизации крупных СЦТ Казахстана и других стран СНГ.

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение, тепловая сеть, термогидравлическое моделирование, программное обеспечение, цифровой двойник, Modelica, оптимизация, прогнозирование

Финансирование. Работа выполнена в рамках исследования, финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP25795155 «Разработка интеллектуальной системы автоматизированного управления и анализа аномалий в теплоснабжении города с применением технологий искусственного интеллекта»).

2.3.1 — системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки);

2.3.5 — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

Введение

Система централизованного теплоснабжения является одновременно инженерной сетью, энергетической системой и объектом управления. Ее модель должна связывать производство теплоты, транспорт теплоносителя, тепловые потери, насосные режимы, тепловые пункты, динамику зданий, аккумулирование и погодозависимое потребление. Поэтому словосочетание «программа для моделирования теплоснабжения» объединяет принципиально разные классы инструментов — от стационарного гидравлического расчета до годовой оптимизации энергобаланса и цифрового двойника реального времени.

Актуальность анализа усиливается переходом от высокотемпературных сетей третьего поколения к низкотемпературным 4GDH и двунаправленным 5GDHC, интеграцией тепловых насосов, отходящего тепла, солнечной и геотермальной энергии, электрических котлов и тепловых аккумуляторов [1–3]. Библиометрическое исследование 9070 Scopus-публикаций за 2004–2023 годы выявило переход исследовательского внимания от интеграции возобновляемых источников к оптимизации сетей, цифровизации, автоматизации, MPC (model predictive control) и управлению спросом [4]. Профильные обзоры систематизируют математические подходы, численные методы и программные средства сетевого моделирования [5, 6], а в [7] дополнительно оцениваются 12 инструментов с позиции высоковозобновляемых систем централизованного теплоснабжения (СЦТ), хранения, реагирования на спрос (demand response) и продвинутого управления.

Основной тезис статьи: программный продукт следует выбирать не по числу функций, а по соответствию между исследовательским вопросом и допустимым уровнем редукции физики. Стационарная модель может быть лучшей для подбора диаметров, квазидинамическая — для годового анализа большой сети, динамическая — для разработки регулятора, MILP-модель — для выбора состава оборудования, GIS-платформа — для паспортизации и эксплуатационных сценариев.

Методика обзора и охват Scopus / Web of Science

Для воспроизводимого систематического поиска предлагаются два эквивалентных запроса:

1. Scopus:

TITLE-ABS-KEY(("district heating" OR "district energy" OR "heat network*" OR "thermal network*") AND (model* OR simulat* OR optim* OR "digital twin*" OR forecast*) AND (software OR tool* OR platform* OR librar* OR solver OR Modelica)) AND PUBYEAR > 2009

2. Web of Science Core Collection:

TS=((("district heating" OR "district energy" OR "heat network*" OR "thermal network*") AND (model* OR simulat* OR optim* OR "digital twin*" OR forecast*) AND (software OR tool* OR platform* OR librar* OR solver OR Modelica))

В дополнительный поиск необходимо включать названия конкретных инструментов: TERMIS/ EcoStruxure District Energy, Leanheat Network, Fluidit Heat, SIR 3S/PT3S, STANET, AD-Net Heat, ROKA3, ZuluThermo, Modelica, Dymola, OpenModelica, DisHeatLib, Buildings.DHC, AixLib, pandapipes, TRNSYS, Simscape, Polysun, EnergyPLAN, energyPRO, nPro, THERMOS, Hotmaps, PyPSA, oemof и TIMES (см. рисунок).

Представление модели СЦТ

Модель СЦТ можно представить как совокупность пяти взаимосвязанных слоев, состав которых определяется масштабом и поколением системы теплоснабжения [1, 8]:

1. Гидравлический слой: давления, расходы, сопротивления труб, насосы, клапаны, дросселирующие устройства, подпитка, переключения и аварийные режимы.

2. Тепловой слой: транспортная задержка, тепловые потери, смешение потоков, температура подачи и обратки, тепловая инерция воды, труб и грунта.

3. Технологический слой: котлы, ТЭЦ, тепловые насосы, теплообменники, аккумуляторы, утилизация отходящего тепла, ограничения мощности и темпа изменения нагрузки.

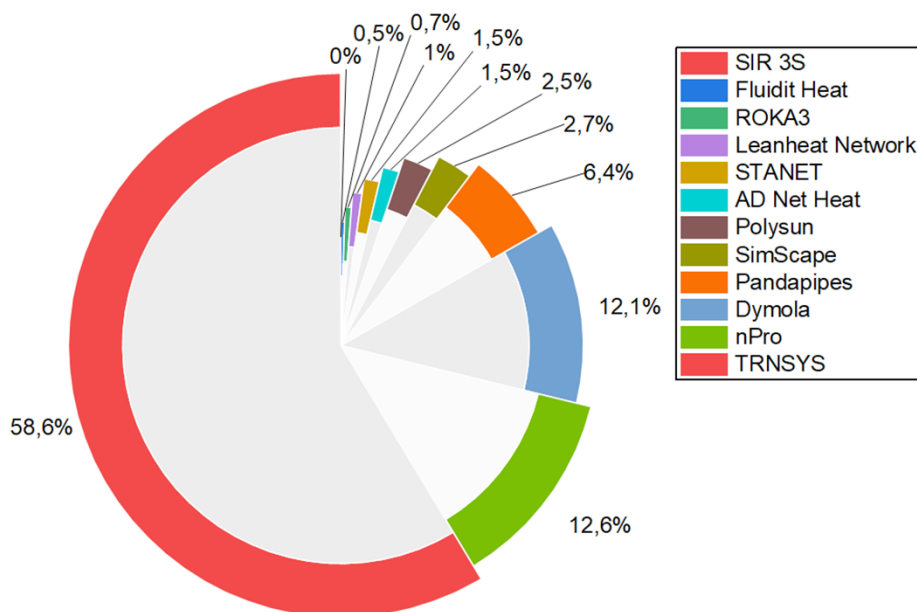


Рисунок. Статистический обзор применения программного обеспечения для моделирования систем централизованного теплоснабжения на основе данных наукометрической базы Scopus

4. Потребительский слой: тепловые пункты, отопление и ГВС, погодозависимая нагрузка, динамика ограждений зданий, локальные регуляторы и реагирование на спрос [9].

5. Экономико-экологический слой: CAPEX/OPEX, топливо и электроэнергия, выбросы, надежность, стоимость недоотпуска, сценарии развития.

Ни один распространенный инструмент не описывает все слои одинаково подробно. Практический выбор является выбором границы модели.

Математические подходы и вычислительный компромисс

Стационарные модели

В стационарной постановке массовый баланс в узлах и зависимость потерь давления от расхода решаются для фиксированного режима; тепловой расчет выполняется при неизменных во времени граничных условиях. Такой подход устойчив, быстр и хорошо подходит для поверочного и наладочного расчета, построения пьезометрических графиков, определения пропускной способности, выбора диаметров и анализа расчетного зимнего режима. Его фундаментальный недостаток — отсутствие транспортной задержки и сетевого аккумулирования. Стационарная модель не должна использоваться

для оценки быстрого изменения температуры источника, MPC или кратковременного реагирования на спрос.

Квазидинамические модели

Квазидинамическая модель предполагает быстрое установление гидравлики и динамический перенос температуры. Физически это оправдано различием скоростей распространения волн давления и теплового фронта. Лагранжевы plug-flow/node-подходы отслеживают порции теплоносителя, эйлеровы схемы дискретизируют трубу по пространству. Квазидинамика обычно дает лучший баланс точности и скорости для часовых/минутных рядов больших сетей [5]. Улучшенный квазидинамический поток нагрузки (load-flow) позволяет учитывать тепловую инерцию и при этом работает существенно быстрее полной динамики [10].

Полностью динамические модели

Полная динамика описывает изменяющиеся во времени гидравлические и тепловые процессы системой ODE/DAE/PDE. Она необходима для анализа быстрых переходов, взаимодействия регуляторов, пуска и останова оборудования, нестандартной топологии и разработки MPC.

Объектно-ориентированная, уравненческая парадигма Modelica особенно удобна для многодоменных систем [11]. Одной из опорных разработок является физически обоснованная и численно устойчивая динамическая модель трубы [12]. Цена детализации — трудная параметризация, жесткие системы уравнений и высокая вычислительная стоимость.

Оптимизационные модели

LP/MILP удобны для выбора оборудования, диспетчеризации источников, аккумулирования и многолетних сценариев [13, 14]. Нелинейная гидравлика при этом линеаризуется, кусочно аппроксимируется или исключается. MINLP и динамическая оптимизация точнее отражают физику, но сложнее масштабируются и могут не гарантировать глобальный оптимум. Поэтому результаты оптимизации целесообразно проверять детальной термодинамической симуляцией. Противопоставление «симуляция или оптимизация» методологически неверно: первая отвечает на вопрос «что произойдет при заданном управлении?», вторая — «какое управление лучше в рамках упрощенной модели?» [15].

Данные, surrogate-модели и гибридные цифровые двойники

Черные ящики — ARIMA, гауссовские процессы (Gaussian processes), нейронные сети, градиентный бустинг (gradient boosting) — эффективны для прогноза нагрузки и быстрого приближения сложной модели [16]. Они слабо экстраполируют за пределы обучающих режимов и не гарантируют соблюдения балансов. Наиболее перспективны серые и гибридные модели: физическое ядро обеспечивает сохранение массы и энергии, а данные уточняют спрос, коэффициенты теплопотерь, состояние арматуры и смещения датчиков [16].

Классы программных средств

Специализированные коммерческие термодинамические платформы

К этому классу относятся EcoStruxure District Energy, Leanheat Network, Fluidit Heat, SIR 3S, STANET, AD-Net Heat, ROKA3 и региональные решения типа ZuluThermo. Их сильная сторона —

готовая сетевая топология, редактор, библиотеки элементов, GIS/SCADA-интеграция, сценарии переключений, калибровка и представление результатов на карте.

EcoStruxure District Energy (ранее — TERMIS) позиционируется как цифровой двойник для проектирования, эксплуатации и оптимизации сетей. Это типичный выбор оператора крупной действующей СЦТ, когда важны диспетчерские сценарии, минимизация потерь и связь с корпоративными данными [17].

Leanheat Network объединяет термодинамическую модель, GIS/SCADA, прогнозирование нагрузки и оптимизацию температур/давлений; подходит для онлайн-операций и планирования производства [18].

Fluidit Heat ориентирован на быстрые годовые временные расчеты полной сети, анализ снижения температуры, подробные тепловые пункты и сценарии; поддерживает интеграцию с GIS, SCADA, NIS и архивами [19].

SIR 3S/PT3S поддерживает стационарные, квазидинамические и динамические режимы; Python-интерфейс PT3S увеличивает воспроизводимость и расширяемость [7, 20].

ZuluThermo особенно релевантен постсоветским высокотемпературным СЦТ: поверочный, наладочный и конструкторский расчет, калибровка, надежность, резерв, переключения, теплопотери, ИТП/ЦТП и GIS-модель. Официальная страница указывает текущую ветвь 10.0 и поддержку кольцевых и тупиковых сетей с несколькими источниками [21].

Ограничения класса: закрытые алгоритмы и форматы, стоимость лицензии, зависимость от поставщика, неодинаковая доступность API и сложность воспроизводимости научной работы. Заявления производителей следует подтверждать тестовой моделью и контрактной спецификацией конкретной версии.

Modelica и объектно-ориентированное динамическое моделирование

Dymola и OpenModelica используют язык Modelica; библиотеки Modelica Standard Library, Buildings, IBPSA, AixLib, DisHeatLib и другие предоставляют трубы, насосы, теплообменники, здания,

источники и регуляторы. Пакет Buildings.DHC содержит модели сетей, центральных установок, тепловых пунктов, нагрузок и примеры [22].

Преимущества: прозрачные уравнения, повторное использование компонентов, визуальное моделирование, многодоменность, связь с оптимизацией и экспорт Functional Mock-up Unit. Применимость Modelica к динамической симуляции и оптимизации сети более чем с 100 потребителями подтверждена расчетным исследованием [11].

Ограничения: высокий порог входа, проблемы инициализации и численной жесткости, а также необходимость дисциплины версионирования библиотек и решателей.

Открытые Python-инструменты

Платформа Pandaripes выполняет стационарный гидравлический и тепловой pipeflow, поддерживает временные ряды и совместную работу с pandarower для multi-energy-систем. Это сильная платформа для воспроизводимых исследований, массовых сценариев и алгоритмов, но не замена специализированной полной квазидинамике: расчетный модуль определяет давления, скорости, температуры и теплообмен при заданных граничных условиях [23], а программная архитектура описана в [24].

Python-экосистема удобна для ETL, калибровки, оптимизации, неопределенности и ML. Ее слабое место — фрагментация: исследователь часто самостоятельно соединяет сетевой расчет, временные ряды, GIS, базу данных и оптимизатор. Для научной статьи это преимущество прозрачности, для круглогодичной эксплуатации — риск сопровождения.

TRNSYS, Simscape/Simulink и Polysun

Эти многодоменные среды не являются исключительно сетевыми, но сильны в моделировании тепловых аккумуляторов, зданий, тепловых насосов, солнечных систем и алгоритмов управления [7, 25]. TRNSYS имеет модульную транзитную структуру и подробную модель здания Type 56; Simscape интегрирован с MATLAB/Simulink и средствами MPC; Polysun предоставляет графический конструктор схем. Согласно сравнительному исследованию, эта группа превосходит многие спе-

циализированные сетевые продукты по гибкости вторичной стороны и зданий, но требует больше труда для адаптации к крупной СЦТ [7].

Инструменты планирования и оптимизации энергосистем

EnergyPLAN, energyPRO, TIMES/MARKAL, OSeMOSYS, PyPSA, oemof и Balmorel отвечают прежде всего на вопросы состава генерации, диспетчеризации, секторальной интеграции, стоимости и выбросов [15]. Они ценны для оценки ТЭЦ, крупных тепловых насосов, электрочилков, накопителей и зависимости от электроэнергетики. Однако сеть часто представлена одной или несколькими агрегированными шинами; локальные давления, транспортные задержки и критические потребители отсутствуют [5, 6].

EnergyPLAN является детерминированной моделью национальных/региональных энергосистем и включает группы централизованного теплоснабжения; актуальная официальная документация относится к версии 17.0 [26]. Такой инструмент нельзя использовать для подбора насосов или оценки температуры у удаленного абонента, но он уместен для сценариев декарбонизации и sector coupling.

Пространственное и предпроектное планирование

THERMOS, Hotmaps и GIS-ориентированные модули определяют плотность тепловой нагрузки, трассировку, зоны экономической эффективности и потенциал источников. nPro соединяет часовую генерацию нагрузок, трассировку/размеры труб, теплопотери, энергоснабжающие центры, экономику и сценарные отчеты; поддерживает горячие, LowEx- и холодные сети, несколько точек подачи и импорт GIS/STANET [27, 28]. Эти инструменты особенно полезны на концептуальной стадии, но детальная проверка эксплуатации должна выполняться сетевым решателем.

Модели зданий и городского спроса

EnergyPlus, IDA ICE, CitySim, TEASER и URBANopt формируют временные профили спроса и оценивают тепловую массу зданий [6, 29].

Их следует рассматривать как источник граничных условий или участника co-simulation, а не как самостоятельную модель магистральной сети. Типичная ошибка — считать почасовой профиль достаточным для проверки кратковременного управления, хотя динамика теплового пункта и сети может требовать шага в минуты [10, 12].

Сравнительная матрица программных средств моделирования СЦТ показана в таблице.

Критерии научно обоснованного сравнения

Оценивать программные средства следует минимум по десяти группам критериев:

1. Назначение и масштаб: здание, квартал, город, регион; расчетный режим или многолетний сценарий.
2. Термогидравлика: стационарная, квазидинамическая или динамическая; теплотери, задержка, смешение, реверс потока.
3. Топология: кольца, несколько источников, переменное направление, 4GDH/5GDHC, первичная и вторичная стороны.

4. Оборудование: насосы и характеристики, клапаны, теплообменники, ТЭЦ, котлы, ТН, аккумуляторы.

5. Управление: температурный/расходный режим, порядок заслуг (merit order), MPC, реагирование на спрос, ограничения скорости изменения.

6. Данные: GIS/BIM, SCADA/OPC, архивы, измерения теплосчетчиков, погода, прогноз.

7. Численные свойства: сходимость, масштабирование, шаг времени, параллельность, воспроизводимость.

8. Калибровка и неопределенность: оценка параметров, доверительные интервалы, анализ чувствительности (sensitivity analysis), обнаружение плохих датчиков.

9. Открытость: доступ к уравнениям, API/FMI-форматам, автоматизации и тестам; лицензия и привязка к поставщику (vendor lock-in).

10. Валидация: сопоставление с измерениями, энергетические балансы, независимые бенчмарк-задачи и документированная область применимости.

Таблица

Сравнительная матрица программных средств моделирования СЦТ

Класс/примеры	Наиболее сильные задачи	Физическая детализация	Интеграция	Основные ограничения
TERMIS, Leanheat, Fluidit, SIR 3S, STANET, ZuluThermo	Эксплуатация, гидравлика, переключения, калибровка, модернизация	Высокая для сети, различная для зданий и установок	GIS/SCADA/API (обычно сильная)	Закрытость, лицензия, зависимость от версии
Dymola/OpenModelica + библиотеки	Динамика, 4GDH/5GDHC, управление, co-simulation	Очень высокая и настраиваемая	FMI, Python/C, внешние оптимизаторы	Порог входа, численная сложность, настройка модели
pandapipes + Python	Воспроизводимые load-flow, сценарии, multi-energy	Средняя, преимущественно стационарная	Отличная программная расширяемость	Нет готового промышленного контура, ограниченная динамика
TRNSYS, Simscape, Polysun	Здания, установки, накопители, вторичная сторона, управление	Высокая на компонентном уровне	Co-simulation и пользовательские компоненты	Трудоемкая сборка большой сетевой модели
EnergyPLAN, TIMES, PyPSA, oemof, energyPRO	Стратегия, dispatch, sector coupling, экономика	Агрегированная сеть	Сценарии, оптимизация, данные рынков	Не определяют локальные давления/температуры
THERMOS, Hotmaps, nPro, GIS	Потенциал, трассировка, технико-экономическая концепция	Упрощенная/средняя	Сильная пространственная аналитика	Не всегда пригодны для онлайн-управления
EnergyPlus, IDA ICE, CitySim, TEASER	Нагрузки зданий и реагирование на спрос	Высокая для потребителя	FMI/API / файловый обмен	Сеть представлена упрощенно или отсутствует

Функция, указанная в рекламной документации, не равнозначна доказанной точности [5, 7]. Для каждого кандидата необходим приемочный тест на одной и той же сети с заранее установленными метриками: ошибка давления, расхода, температуры и тепловой мощности; нарушение ограничений; время расчета; трудозатраты на подготовку данных; устойчивость к пропускам и выбросам.

Специфика крупных постсоветских СЦТ

Для Казахстана и других стран с крупными высокотемпературными системами приоритеты отличаются от новых европейских 5GDHC-проектов [2, 3, 8]. Научно и практически важнее:

- восстановить достоверную топологию и паспорта труб;
- учесть износ изоляции, утечки и завышенные расчетные нагрузки;
- корректно представить ЦТП/ИТП, элеваторные и смешивающие схемы;
- откалибровать сеть по разрозненным данным давления, температуры и коммерческого учета;
- оценить перетоп, высокую температуру обратной воды, избыточную циркуляцию и насосные затраты;
- моделировать аварийные переключения, резервирование и поэтапную реконструкцию;
- только после калибровки анализировать снижение температурного графика, автоматизацию и интеграцию тепловых насосов/накопителей.

Следовательно, «лучший» начальный продукт необязательно самый динамический. Нужен инструмент, который быстро создает и поддерживает единую GIS-модель, решает многоконтурную гидравлику, представляет местные схемы присоединения и допускает автоматизированную калибровку. Для исследовательского слоя к нему целесообразно подключить Python/Modelica, не заменяя эксплуатационную модель экспериментальным кодом.

Интеграция предпочтительна через документированный API, FMI или OPC UA. Следует разделять модель для планирования и для онлайн-управления: первая может быть детальнее и медленнее, вторая обязана укладываться в такт принятия решений

и устойчиво работать при неполных данных. Кибербезопасность, журналирование версий и возможность ручного отклонения рекомендации являются частью модели эксплуатации, а не внешними дополнениями.

Основные пробелы и перспективные направления исследований

1. Открытые бенчмарк-сети. Нужны эталонные топологии различного масштаба с измеренными динамическими режимами, а не только синтетические примеры.

2. Сопоставимость решателей. Один и тот же сценарий часто задается различными граничными условиями; требуются формальные бенчмарк-протоколы и нейтральные форматы.

3. Гибридные модели. Перспективно совмещать физические ограничения с ML для прогноза и калибровки и пониженный порядок моделей [16].

4. Неопределенность. Большинство работ оптимизируют один прогноз; необходимы стохастический/устойчивый MPC, интервальные параметры и оценка риска недоотпуска.

5. Масштабируемая динамика. Актуальны адаптивная дискретизация, модельная редукция, дифференцируемые решатели и параллельные вычисления.

6. 5GDHC и двунаправленность. Недостаточно унифицированы термины, модели просьюмеров и методы управления при одновременном тепле и холоде [2, 3].

7. Валидация управления. Литература богата симуляциями, но бедна длительными полевыми испытаниями, анализом аппаратного обеспечения в контуре управления и оценкой человеческого фактора [5, 7, 9].

8. Жизненный цикл цифрового двойника. Требуются методы автоматического выявления расхождения между GIS, фактическим положением арматуры и данными датчиков.

9. Экономика качества данных. Необходимо связывать стоимость дополнительных датчиков с уменьшением неопределенности и операционной выгодой.

10. Локальная применимость. Для сурового континентального климата, высоких температур

и изношенных сетей Казахстана нужны открытые наборы данных и независимые сравнения программ.

Заключение

1. Программные средства СЦТ образуют не линейный рейтинг, а экосистему взаимодополняющих классов. Специализированные сетевые платформы наиболее зрелы для эксплуатации, Modelica и Simscape — для динамики и управления, Python — для воспроизводимой аналитики, EnergyPLAN/TIMES/PyPSA — для энергетической стратегии, GIS-инструменты — для пространственного планирования.

2. Квазидинамическая термогидравлика является практическим компромиссом для больших сетей и длительных временных рядов. Полная динамика

оправдана, когда исследовательский вопрос зависит от быстрых переходов и регуляторов.

3. Агрегированная оптимизация не заменяет сетевой расчет. Выбранный ею состав оборудования и график должны проходить проверку по давлениям, расходам, задержкам и температурам у потребителей.

4. Для действующей крупной СЦТ качество данных и калибровки важнее номинальной сложности решателя. Некалиброванная детальная модель может быть менее надежной, чем простая, но идентифицированная.

5. Наиболее перспективен не один монолитный продукт, а модульный цифровой двойник с GIS/SCADA, физическим сетевым ядром, прогнозом, оптимизацией и открытыми интерфейсами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating Smart Thermal Grids into Future Sustainable Energy Systems / H. Lund [et al.] // *Energy*. 2014. Vol. 68. Pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089
2. 5th Generation District Heating and Cooling Systems: A Review of Existing Cases in Europe / S. Buffa [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 104. Pp. 504–522. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.059
3. Gjoka K., Rismanchi B., Crawford R. H. Fifth-Generation District Heating and Cooling Systems: A Review of Recent Advancements and Implementation Barriers // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 171. Art. no. 112997. 14 p. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112997
4. Worldwide Scientific Landscape on District Heating Systems / A.-J. Perea-Moreno [et al.] // *Energy Efficiency*. 2026. Vol. 19. Art. no. 19. 28 p. DOI: 10.1007/s12053-026-10419-4
5. Design and Simulation of District Heating Networks: A Review of Modeling Approaches and Tools / S. Kuntuarova [et al.] // *Energy*. 2024. Vol. 305. Art. no. 132189. 15 p. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132189
6. A Review of Modelling Approaches and Tools for the Simulation of District-Scale Energy Systems / J. Allegrini [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52. Pp. 1391–1404. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.123
7. District Heating Modeling Tools: A Review Based on Design and Simulation of Renewable District Heating Networks / L. V. Valentini [et al.] // *Energy Conversion and Management: X*. 2026. Vol. 29. Art. no. 101414. 21 p. DOI: 10.1016/j.ecmx.2025.101414
8. Werner S. International Review of District Heating and Cooling // *Energy*. 2017. Vol. 137. Pp. 617–631. DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.045
9. Guelpa E., Verda V. Demand Response and Other Demand Side Management Techniques for District Heating: A Review // *Energy*. 2021. Vol. 219. Art. no. 119440. 16 p. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119440
10. A New Quasi-Dynamic Load Flow Calculation for District Heating Networks / J. Steinegger [et al.] // *Energy*. 2023. Vol. 266. Art. no. 26410. 17 p. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126410
11. District Heating and Cooling Systems — Framework for Modelica-Based Simulation and Dynamic Optimization / G. Schweiger [et al.] // *Energy*. 2017. Vol. 137. Pp. 566–578. DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.115
12. Dynamic Equation-Based Thermo-Hydraulic Pipe Model for District Heating and Cooling Systems / B. van der Heijde [et al.] // *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 151. Pp. 158–169. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.08.072
13. Jiang M., Rindt C., Smeulders D. M. J. Optimal Planning of Future District Heating Systems — A Review // *Energies*. 2022. Vol. 15, iss. 19. Art. no. 7160. 38 p. DOI: 10.3390/en15197160

14. Morvaj B., Evins R., Carmeliet J. Optimising Urban Energy Systems: Simultaneous System Sizing, Operation and District Heating Network Layout // *Energy*. 2016. Vol. 116, part 1. Pp. 619–636. DOI: 10.1016/j.energy.2016.09.139
15. Simulation versus Optimisation: Theoretical Positions in Energy System Modelling / H. Lund [et al.] // *Energies*. 2017. Vol. 10, iss. 7. Art. no. 840. 17 p. DOI: 10.3390/en10070840
16. Zhou Y., Zheng S., Hensen J. L. M. Machine Learning-Based Digital District Heating/Cooling with Renewable Integrations and Advanced Low-Carbon Transition // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 199. Art. no. 114466. 25 p. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114466
17. EcoStruxure District Energy Brochure. Version 8.2 // Schneider Electric. 04.09.2023. URL: <http://www.se.com/us/en/download/document/EcoStruxureDistrictEnergy> (дата обращения: 26.08.2026).
18. Leanheat® Network // Danfoss. URL: <http://www.danfoss.com/en/products/dhs/software-solutions/products/danfoss-leanheat-software-suite-services/leanheat-network> (дата обращения: 20.08.2026).
19. Fluidit Heat™ Modeling Platform for District Energy Systems. URL: <http://www.fluiditeurope.com> (дата обращения: 20.08.2026).
20. Python Tools 3S Documentation. Version 90.15.1. URL: <http://3sconsult.github.io/PT3S/started.html> (дата обращения: 26.08.2026).
21. ZuluThermo — моделирование гидравлических режимов в тепловых сетях. URL: <http://www.politerm.com/products/thermo/zuluthermo/> (дата обращения: 20.08.2026).
22. Buildings.DHC Users Guide. URL: <http://build.openmodelica.org/Documentation/Buildings.DHC.UsersGuide.html> (дата обращения: 20.08.2026).
23. Pipeflow — pandapipes 0.14.0 documentation. URL: <http://pandapipes.readthedocs.io/en/latest/pipeflow.html> (дата обращения: 20.08.2026).
24. Pandapipes: An Open-Source Piping Grid Calculation Package for Multi-Energy Grid Simulations / D. Lohmeier [et al.] // *Sustainability*. 2020. Vol. 12, iss. 23. Art. no. 9899. 39 p. DOI: 10.3390/su12239899
25. Guelpa E., Verda V. Thermal Energy Storage in District Heating and Cooling Systems: A Review // *Applied Energy*. 2019. Vol. 252. Art. no. 113474. 22 p. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113474
26. EnergyPLAN—Advanced Energy Systems Analysis Computer Model. Documentation Version 17.0. Aalborg: Sustainable Energy Planning Research Group, Aalborg University, 2026. 199 p. URL: <http://energyplan.eu/about-energyplan/documentation> (дата обращения: 20.08.2026).
27. Wirtz M. nPro: A Web-Based Planning Tool for Designing District Energy Systems and Thermal Networks // *Energy*. 2023. Vol. 268. Art. no. 126575. 12 p. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126575
28. nPro — Planning Tool for Buildings and Districts. URL: <http://www.npro.energy/main/en> (дата обращения: 20.08.2026).
29. Simulation Tools to Build Urban-Scale Energy Models: A Review / A. Sola [et al.] // *Energies*. 2018. Vol. 11, iss. 12. Art. no. 3269. 24 p. DOI: 10.3390/en11123269

Дата поступления: 27.08.2026

Решение о публикации: 29.08.2026

Analysis of Software Tools for Modeling District Heating Systems

- Irbulat T. Utepbergenov** — Dr. Sci. in Engineering, Professor of the Department of Automation and Control. Research interests: automated process control systems, artificial intelligence, automation of scientific experiment data collection and processing, transport. E-mail: i.utepbergenov@aes.kz
- Ainagul M. Seitbekova** — M. S., Senior Lecturer at the Department of Cybersecurity. Research interests: information systems, automated process control systems, digital twins in the energy sector. E-mail: a.seitbekova@aes.kz

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev, 126/1 Baitursynuly str., Almaty, 050013, Kazakhstan

For citation: Utepbergenov I. T., Seitbekova A. M. Analysis of Software Tools for Modeling District Heating Systems, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 3 (47), pp. 82–92. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-82-92 (In Russian)

Abstract. This article presents an overview of software tools for modeling district heating systems to enable heat supply companies to make informed choices and develop optimal software packages. **Purpose:** to systematize software tools for modeling district heating systems (DHS), compare the mathematical approaches implemented in them, and determine the applicability limits of tools for design, performance analysis, modernization, optimal control, and the creation of digital twins. **Methods:** multi-criteria comparative analysis by thermo-hydraulic model type, temporal and spatial scale, equipment composition, optimization capabilities, calibration, and integration with GIS/SCADA, API, FMI, and OPC. **Results:** demonstrate the effectiveness of specialized network platforms for operation and performance calculations, while Modelica-compatible environments are used for detailed dynamic modeling and control development. **Practical significance:** lies in the possibility of using the proposed classifications, comparative criteria, and research selection matrix in the digitalization and phased modernization of large DHSs in Kazakhstan and other CIS countries.

Keywords: district heating, heat network, thermo-hydraulic modelling, software, digital twin, Modelica, optimization, forecasting

REFERENCES

1. Lund H., et al. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating Smart Thermal Grids into Future Sustainable Energy Systems, *Energy*, 2014, vol. 68, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089
2. Buffa S., et al. 5th Generation District Heating and Cooling Systems: A Review of Existing Cases in Europe, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 104, pp. 504–522. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.059
3. Gjoka K., Rismanchi B., Crawford R. H. Fifth-Generation District Heating and Cooling Systems: A Review of Recent Advancements and Implementation Barriers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, vol. 171, art. no. 112997, 14 p. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112997
4. Perea-Moreno A.-J., et al. Worldwide Scientific Landscape on District Heating Systems, *Energy Efficiency*, 2026, vol. 19, art. no.19, 28 p. DOI: 10.1007/s12053-026-10419-4
5. Kuntuarova S., et al. Design and Simulation of District Heating Networks: A Review of Modeling Approaches and Tools, *Energy*, 2024, vol. 305, art. no. 132189, 15 p. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132189
6. Allegrini J., et al. A Review of Modelling Approaches and Tools for the Simulation of District-Scale Energy Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1391–1404. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.123
7. Valentini L. V., et al. District Heating Modeling Tools: A Review Based on Design and Simulation of Renewable District Heating Networks, *Energy Conversion and Management: X*, 2026, vol. 29, art. no. 101414, 21 p. DOI: 10.1016/j.ecmx.2025.101414
8. Werner S. International Review of District Heating and Cooling, *Energy*, 2017, vol. 137, pp. 617–631. DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.045
9. Guelpa E., Verda V. Demand Response and Other Demand Side Management Techniques for District Heating: A Review, *Energy*, 2021, vol. 219, art. no. 119440, 16 p. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119440
10. Steinegger J., et al. A New Quasi-Dynamic Load Flow Calculation for District Heating Networks, *Energy*, 2023, vol. 266, art. no. 126410, 17 p. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126410

11. Schweiger G., et al. District Heating and Cooling Systems — Framework for Modelica-Based Simulation and Dynamic Optimization, *Energy*, 2017, vol. 137, pp. 566–578. DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.115
12. van der Heijde B., et al. Dynamic Equation-Based Thermo-Hydraulic Pipe Model for District Heating and Cooling Systems, *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 151, pp. 158–169. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.08.072
13. Jiang M., Rindt C., Smeulders D. M. J. Optimal Planning of Future District Heating Systems — A Review, *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 19, art. no. 7160, 38 p. DOI: 10.3390/en15197160
14. Morvaj B., Evins R., Carmeliet J. Optimising Urban Energy Systems: Simultaneous System Sizing, Operation and District Heating Network Layout, *Energy*, 2016, vol. 116, part 1, pp. 619–636. DOI: 10.1016/j.energy.2016.09.139
15. Lund H., et al. Simulation versus Optimisation: Theoretical Positions in Energy System Modelling, *Energies*, 2017, vol. 10, iss. 7, art. no. 840, 17 p. DOI: 10.3390/en10070840
16. Zhou Y., Zheng S., Hensen J. L. M. Machine Learning-Based Digital District Heating/Cooling with Renewable Integrations and Advanced Low-Carbon Transition, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, vol. 199, art. no. 114466, 25 p. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114466
17. EcoStruxure District Energy Brochure. Version 8.2, *Schneider Electric*. Published online at September 04, 2023. Available at: <http://www.se.com/us/en/download/document/EcoStruxureDistrictEnergy> (accessed: August 26, 2026).
18. Leanheat® Network, *Danfoss*. Available at: <http://www.danfoss.com/en/products/dhs/software-solutions/products/danfoss-leanheat-software-suite-services/leanheat-network> (accessed: August 20, 2026).
19. Fluidit Heat™ Modeling Platform for District Energy Systems. Available at: <http://www.fluiditeurope.com> (accessed: August 20, 2026).
20. Python Tools 3S Documentation. Version 90.15.1. Available at: <http://3sconsult.github.io/PT3S/started.html> (accessed: August 26, 2026).
21. ZuluThermo — Hydraulic Modeling for District Heating Systems. Available at: <https://www.politerm.com/en/products/thermo/zuluthermo/> (accessed: August 20, 2026).
22. Buildings.DHC Users Guide. Available at: <http://build.openmodelica.org/Documentation/Buildings.DHC.UsersGuide.html> (accessed: August 20, 2026).
23. Pipeflow — Pandapipes 0.14.0 Documentation. Available at: <http://pandapipes.readthedocs.io/en/latest/pipeflow.html> (accessed: August 20, 2026).
24. Lohmeier D., et al. Pandapipes: An Open-Source Piping Grid Calculation Package for Multi-Energy Grid Simulations, *Sustainability*, 2020, vol. 12, iss. 23, art. no. 9899, 39 p. DOI: 10.3390/su12239899
25. Guelpa E., Verda V. Thermal Energy Storage in District Heating and Cooling Systems: A Review, *Applied Energy*, 2019, vol. 252, art. no. 113474, 22 p. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113474
26. EnergyPLAN — Advanced Energy Systems Analysis Computer Model. Documentation Version 17.0. Aalborg, Sustainable Energy Planning Research Group, Aalborg University, 2026, 199 p. Available at: <http://energyplan.eu/about-energyplan/documentation> (accessed: August 20, 2026).
27. Wirtz M. nPro: A Web-based Planning Tool for Designing District Energy Systems and Thermal Networks, *Energy*, 2023, vol. 268, art. no. 126575, 12 p. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126575
28. nPro — Planning Tool for Buildings and Districts. Available at: <http://www.npro.energy/main/en> (accessed: August 20, 2026).
29. Sola A., et al. Simulation Tools to Build Urban-Scale Energy Models: A Review, *Energies*, 2018, vol. 11, iss. 12, art. no. 3269, 24 p. DOI: 10.3390/en11123269

Received: August 27, 2026

Accepted: August 29, 2026

УДК 51-74

Передача информации в канале ТЧ без применения нелинейной операции модуляции

Ходаковский Валентин Аветикович — доктор техн. наук, профессор. Профессор кафедры «Информатика и информационная безопасность». Научные интересы: математическое моделирование, информационные системы, обработка больших данных, случайные процессы, обработка и синтез сигналов. E-mail: hval104@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ходаковский В. А. Передача информации в канале ТЧ без применения нелинейной операции модуляции // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 3 (47). С. 93–103. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-93-103

Аннотация. Изложен способ передачи информации по узкополосному каналу связи без нелинейной операции модуляции. **Цель:** повышение удельной скорости передачи информации за счет использования в качестве носителя циклических финитных базисных функций — ковлета и сивлета (импульсных аналогов косинуса и синуса), синтезированных под заданный канал связи. Нелинейная операция модуляции заменена на линейную операцию весового суммирования базисных функций, имеющих спектр, точно соответствующий полосе выделенного канала связи. Информация содержится в векторе весовых коэффициентов. **Методы:** математическое моделирование процессов синтеза ортогональных носителей, ввода информации путем операции умножения базисной матрицы на информационный вектор в процессе передачи и обратной операции умножения транспонированной базисной матрицы на вектор принятого сигнала в процессе приема сообщения. **Результаты:** математическое моделирование канала связи при наличии шумов показывает возможность приближения к пределу Шеннона по удельной скорости передачи при отношении сигнал/шум, близком к 1. Приведены предельные оценки скорости передачи информации для нового способа ввода информации в узкополосный сигнал. **Практическая значимость:** достигнутый результат может быть внедрен в любые радиотехнические системы, связанные с применением узкополосных сигналов в различных диапазонах волн — от акустических до световых.

Ключевые слова: матричные операции, ковариационная матрица, базисные ортогональные функции, циркулянтные матрицы

1.2.2 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

Введение

Несмотря на огромные успехи, достигнутые в современной технике радиосвязи за счет применения цифровых технологий, полного перехода от аналоговой техники связи к цифровой пока так и не произошло. И связано это прежде всего с тем, что для передачи информации по каналу

связи используются различные методы модуляции (амплитудная — АМ, фазовая — ФМ, частотная — ЧМ) несущего синусоидального колебания более низкочастотным колебанием, которое и содержит передаваемую информацию. Название метода модуляции непосредственно связано с тем, какой из

параметров несущего колебания используется для передачи информации: амплитуда, фаза или частота. Вместе с тем хорошо известно, что воздействие на один из параметров несущего колебания приводит к одновременному изменению двух других параметров, то есть изменение амплитуды несущего колебания по закону $A(t)$ приводит к формированию модулированного колебания со средней частотой F_0 вида $S(t) = A(t) \cdot \cos(2\pi \cdot F_0 \cdot t)$, у которого огибающая изменяется по закону $A(t)$, средняя фаза по закону $\varphi(t) = 2\pi \cdot F_0 \cdot t$, а мгновенная фаза и мгновенная частота являются результатом нелинейной операции перемножения модулирующего и несущего колебаний, в результате которой появляются верхняя и нижняя боковые частоты.

В статье рассматривается проблема, связанная с возможностью повышения скорости передачи информации в узкополосном канале связи при использовании цифровых реализаций стандартных методов модуляции синусоидального несущего колебания. Основная трудность здесь состоит в том, что для успешного слежения за любым параметром (амплитудой, фазой и частотой) несущего колебания необходимо достаточно медленно изменять любой из этих информационных параметров. Для реализации этого условия верхняя частота спектра информационного модулирующего колебания обычно должна быть в десятки раз ниже частоты несущего колебания, что резко снижает эффективность использования выделенной полосы частот канала связи. Например, при реализации бинарной передачи, когда информационная единица передается в течение одного полного периода колебания с частотой, равной верхней границе f_v полосы канала связи, с нулевой фазой $\varphi = 0$, а информационный ноль также имеет длительность одного периода, но с фазой $\varphi = \pi$, сформированный сигнал будет иметь практически бесконечный спектр, существенно превышающий частоту f_v , поскольку резкое изменение фазы приведет к появлению высокочастотных гармоник частоты f_v , причем аналогичный результат будет получен при использовании для манипуляции любого другого параметра несущего колебания (амплитуды или частоты). Удельная скорость передачи информации в описанном методе будет

в точности равна пределу Шеннона — 1 бит/с/Гц, но принять без ошибок такой сигнал, прошедший через узкополосный канал связи, будет невозможно, поскольку канальный фильтр не пропустит ВЧ-гармоники, что сильно исказит переданный сигнал и приведет к межсимвольным ошибкам передачи.

Краткий обзор известных методов повышения скорости передачи информации

Автор статьи вместе со своим учеником за последние два года опубликовал несколько статей, докладов и заявок на регистрацию программ [1–5], посвященных методам повышения скорости передачи информации за счет использования ортогональных базисных функций на конечном интервале времени. Вместе с тем из хорошо известных и наиболее близких по существу к излагаемому в статье методу синтеза цифрового сигнала является метод, изложенный в теореме отсчетов академика В. А. Котельникова [6], которая толковалась не как метод синтеза непрерывного сигнала по известным дискретным (цифровым) отсчетам, а как минимально необходимое количество отсчетов, нужное для точного описания непрерывного сигнала со спектром, ограниченным полосой $[0, f_v]$:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{m-1} A_k \operatorname{sinc} \left[2\pi f_v \left(t - \frac{k}{2f_v} \right) \right], \quad (1)$$

где $S(t)$ — синтезированный сигнал, спектр которого сосредоточен в полосе $[0, f_v]$;

A_k — информационный вектор, несущий информацию;

f_v — верхняя граничная частота в спектре сигнала;

m — размерность информационного вектора (количество ортогональных функций на интервале T).

Если задана частота дискретизации сигнала F_s , то формула (1) может быть записана в матричной форме:

$$S = B \cdot A, \quad (2)$$

где $B_{i,k} = \operatorname{sinc} \left[2\pi f_v \left(\frac{i}{F_s} - \frac{k}{2f_v} \right) \right]$ — матрица базис-

ных функций размерности $N \times m$;

A — информационный вектор размерности $m \times 1$.

В матричном виде обратной операцией, восстанавливающей информационный вектор A , будет операция

$$A = B^T \cdot S \cdot \frac{2f_v}{F_s}. \quad (3)$$

Первой проблемой, возникающей при использовании синтеза (модуляции) по методу (1, 2) и анализа (демодуляции) (3), является тот факт, что затухание функции $\text{sinc}(x)$ происходит достаточно медленно, поскольку областью определения этой функции является бесконечная ось времени, что приводит к межсимвольной интерференции. Именно поэтому автором статьи и его учеником предложен способ формирования sinc -подобной функции с косинусным временным окном [7, 8]. В частности, в [8] приведена формула

$$h(f, t) = \text{sinc} \left[2\pi f \left(t - \frac{T}{2} \right) \right] \cos \left[\frac{\pi}{T} \left(t - \frac{T}{2} \right) \right], \quad (4)$$

которая, будучи подставленной в (1), даст новый вариант синтеза цифрового сигнала:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{m-1} A_k \text{sinc} \left[2\pi f_v \left(t - \frac{T}{2} + \frac{k}{2f_v} \right) \right] \cos \left[\frac{\pi}{T} \left(t - \frac{T}{2} + \frac{k}{2f_v} \right) \right]. \quad (5)$$

В отличие от (1) в формуле (5) базис является периодическим с периодом T , что обеспечивает формирование периодического сигнала, а значит, обеспечивается финитность не только по частоте, но и по времени.

Второй проблемой использования sinc -подобных функций является полоса сформированного сигнала, которая содержит компоненты вплоть до постоянной составляющей, но такой спектр не может быть передан по беспроводным каналам связи, поэтому в [7] приведен вариант базиса, построенного на основе импульсной характеристики полосового фильтра. Несколько иной подход для формирования базиса на основе идеального полосового фильтра описывается в следующем разделе.

Общие принципы реализации импульсной характеристики идеального полосового фильтра

Основная идея построения упомянутого выше базиса состоит в том, что частотная характери-

стика полосового фильтра может быть выражена как нормированная разность частотных характеристик двух идеальных НЧ-фильтров, в первом из которых частотой среза является верхняя граница полосы пропускания, а во втором частота среза равна нижней границе полосы пропускания. После получения частотной характеристики выполняется ее преобразование Фурье, и действительная часть этого преобразования будет являться требуемой импульсной характеристикой полосового фильтра. При построении дискретного фильтра для получения высокой линейности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и ее симметричности относительно средней частоты требуется, чтобы число точек описания фильтра было нечетным.

Второй вариант построения импульсной характеристики (ИХ) идеального полосового фильтра состоит в том, что ее можно получить как результат модуляции средней частоты (по сути, несущей) формируемого полосового фильтра косинусной функцией, как это сделано в (4), причем в этом варианте для получения базиса не потребуется выполнения обратного преобразования Фурье. Таким образом, ИХ полосового фильтра может быть получена следующим путем:

$$h = \text{sinc} \left[\pi (f_v - f_n) t_c \right] \cos \left(\pi \frac{t_c}{T} \right) \cos \left(\pi (f_v + f_n) t_c \right), \quad (6)$$

$$\text{где } t_{c_i} = \frac{i - \frac{N-1}{2} + 2}{F_s}, \quad i = 0, 1, \dots, N-1.$$

На рис. 1 приведен вид сформированной ИХ полосового фильтра и его АЧХ.

При анализе рис. 1 можно заметить, что в отличие от идеального фильтра НЧ, который формируется функцией отсчетов $\text{sinc}(x)$, у функции (6) среднее значение равно нулю, что указывает на отсутствие постоянной составляющей. Это значит, что результат синтеза сигнала, аналогичный приведенному в формуле (5), но с весовой функцией (6), будет иметь спектр, точно укладывающийся в выделенную полосу канала связи. При этом следует обратить внимание на то, что «хвосты» у функции (6) так же велики, как и у функции отсчетов $\text{sinc}(x)$.

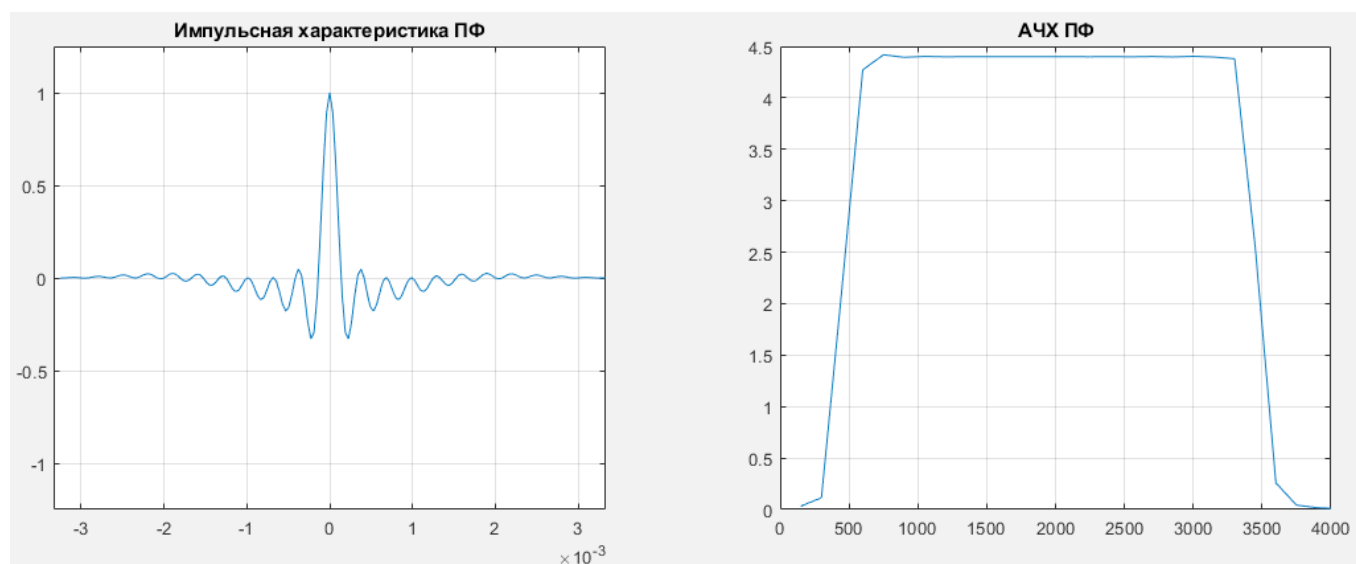


Рис. 1. Импульсная характеристика и АЧХ полосового фильтра

Построение базиса на основе импульсной характеристики идеального полосового фильтра

Полный анализ импульсной характеристики идеального полосового фильтра привел к гипотезе о возможности формирования симметричной функции отсчетов типа вейвлета, которая будет состоять из разности функций (6): основной и циклически смещенной по оси времени на интервал корреляции.

На рис. 2 и 3 приведены сформированные вейвлеты и их спектры. Анализ приведенных графиков позволяет заключить, что гипотеза подтвердилась,

поскольку затухание «хвостов» полученных вейвлетов намного более интенсивное, при этом полученные спектры не выходят за пределы выделенной полосы канала. Сами спектры, в отличие от строго линейной АЧХ полосового фильтра, имеют колоколообразный вид, и энергетические максимумы действительных и мнимых частей спектра смещены в разные стороны от центральной частоты. В листинге 1 приведен текст программы в среде MATLAB, позволяющей рассчитать импульсную характеристику полосового фильтра и получить требуемые вейвлеты.



Рис. 2. Центрированные вейвлеты

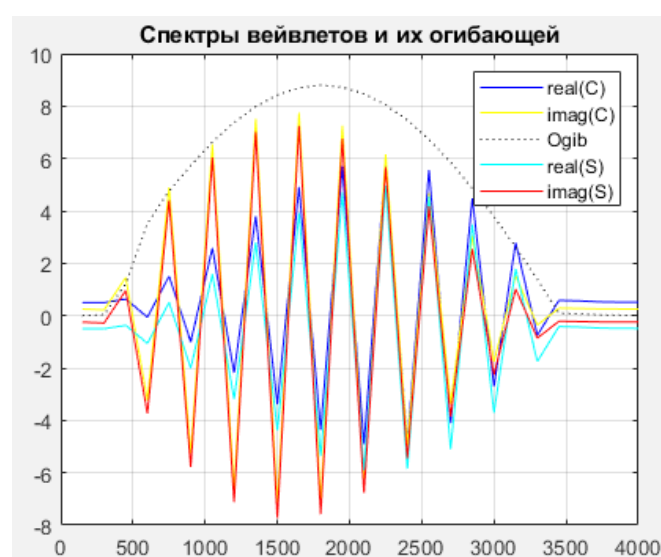


Рис. 3. Спектры вейвлетов

```

fn=300; fv=3300; kf=8; Fs=kf*fv; T=2/fn; fc=(fv+fn)/2;
Pol=fv-fn; N=floor(T*Fs);
% Обеспечиваем нечетное число коэффициентов для строгой симметрии
if mod(N,2)==0; N=N+1; end; n=0:N-1; t_c=(n-(N-1)/2+2)/Fs;
tc=((0:N-1)-(N-1)/2+2)/Fs; %
h=sinc((Pol).*tc).*cos(pi.*tc./T).*cos(2*pi*fc.*tc);
h=h/max(abs(h)); Sp=fft(h); % Нормировка ИХ и вычисление ее спектра
C=h-circshift(h, kf); S=circshift(C, kf/2); O=sqrt(C.^2+S.^2);
SpC=fft(C); SpS=fft(C); SpO=fft(C);

```

Листинг 1. Программа расчета ИХ полосового фильтра и формирования вейвлетов для канала связи с полосой частот [300, 3400] Гц

Полученные вейвлеты после преобразования могут быть использованы как порождающие векторы для формирования ортогональных циркулянтных базисных матриц цифрового синтеза и анализа сигналов для передачи по каналу связи с выделенной полосой частот. На рис. 2 видно, что вейвлеты специально центрированы относительно выделенного интервала времени T , но в течение этого интервала можно всего сформировать $m = E(N/(2,5 \cdot kf))$ пар базисных вейвлетов, а для условий, приведенных в программе (листинг 1), получим $m = 8$. То есть на интервале $T = 2/f_n = 6,667$ мс можно независимо сформировать 8 пар вейвлетов, а значит, базисная матрица каждого из вейвлетов будет содержать по 8 столбцов. Если каждый из вейвлетов будет передавать 2 уровня (бинарная передача), то скорость передачи в такой системе составит $V_k = 2m \cdot \log_2 2 = 2400$ бит/с. Теоретический предел при этом $V = 3100$ бит/с.

На рис. 4 приведены первые два вейвлета из этого набора.

Как было указано выше, полученные вейвлеты — **ковлет** (от слов «косинус» и «вейвлет») $\Psi_c(t, k)$ и **сивлет** (от слов «синус» и «вейвлет») $\Psi_s(t, k)$ — используются как порождающие функции ортогональных матриц, применяемых для синтеза и анализа принятого сигнала. Сами матрицы B_c и B_s формируются как циркулянтные путем циклического сдвига порождающих вейвлетов на интервал корреляции, который для условий, приведенных на рис. 4, составляет 40 точек (40 периодов частоты дискретизации F_s).



Рис. 4. Первые из вейвлетов сформированного базиса

Синтез канального сигнала, содержащего информацию в псевдофазе

Если канальный сигнал формируется так, что информация будет содержаться в псевдофазе вейвлетов, то для получения сигнала, несущего информацию в виде информационных независимых весовых коэффициентов A_k и C_k , выполняется матричная операция:

$$S = B_c \cdot A_k + B_s \cdot C_k, \quad (7)$$

где информационные весовые коэффициенты $A_k = \cos u$ и $C_k = \sin u$ являются векторами размерности $m \times 1$, где u — вектор, содержащий информацию об угле;

B_c и B_s — ковлетовская и сивлетовская ортогональные матрицы размерности $N \times m$, $m = E(4f_v/3f_n)$, где $N = E(T \cdot F_s)$, F_s — частота дискретизации, $E(x)$ — выделение целой части.

В результате с учетом нормирования ковариационных матриц получаем:

$$B_c^T \cdot B_c = E, \quad B_s^T \cdot B_s = E. \quad (8)$$

Выражение (8) доказывает строгое выполнение ортогональности матриц B_c и B_s . Причем нормированные взаимные ковариационные матрицы $B_s^T \cdot B_c$ и $B_c^T \cdot B_s$ на главной диагонали имеют очень малые значения, а остальные элементы — близкие к нулю.

В развернутом виде указанную операцию синтеза канального сигнала (7) можно записать как:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{m-1} [A_k \Psi_c(t, k) + C_k \Psi_s(t, k)]. \quad (9)$$

В выражении (9) базисные функции $\Psi_c(t, k)$ — ковлет — и $\Psi_s(t, k)$ — сивлет — сходны с одним периодом тригонометрических функций $\cos x$ и $\sin x$, но быстро затухающих на временном интервале $T = 2/f_n$ и имеющих среднюю частоту, соответствующую центральной частоте выделенного канала связи, при этом коэффициент k — временной сдвиг функций на интервал корреляции.

Синтез канального сигнала, содержащего информацию и в амплитуде, и в псевдофазе

Ранее было указано, что при обычной модуляции осуществить независимое изменение амплитуды и фазы одной несущей практически невозможно, но в предлагаемом методе синтеза ковлет и сивлет, по сути, представляют собой строго локализованные по времени функции, представляющие аналитический сигнал, в котором ковлет — действительная, а сивлет — мнимая часть, являющиеся взаимно ортогональными, и могут быть изображены на комплексной плоскости, где параметрами являются угол и длина радиус-вектора, то есть амплитуда или огибающая для данной пары вейвлетов. Для смежных вейвлетов, смещенных на интервал корреляции огибающая и угол будут другими, что и можно использовать для передачи информации. Таким

образом, при этом варианте синтеза канального сигнала информационные векторы для каждой пары вейвлетов будут содержать три значения: одно — для огибающей (амплитуды) и два — для угла (псевдофазы). Тогда выражение (9) можно изменить так:

$$S(t) = \sum_{k=0}^{m-1} D_{k,0} [D_{k,1} \Psi_c(t, k) + D_{k,2} \Psi_s(t, k)], \quad (10)$$

где $D_{k,0}$ — информация о текущей огибающей;

$D_{k,1} = \cos u$ и $D_{k,2} = \sin u$ — информация об угле u , то есть текущем положении принятого вейвлета относительно ковлета и сивлета соответственно.

Следует отметить, что коэффициенты $D_{k,1}$ и $D_{k,2}$ в (10) фактически несут информацию не о псевдофазе, а о линейном сдвиге принятого из канала вейвлета относительно опорных ковлета и сивлета, поскольку вейвлеты сформированы как инвариантные к временному сдвигу.

Описанный метод синтеза канального сигнала можно сравнить с модуляцией OFDM, где информация содержится в амплитуде и фазе набора ортогональных несущих, что можно отображать информационными созвездиями. Количество ортогональных несущих при этом вычисляется как отношение верхней граничной частоты спектра сигнала к шагу по частоте $df = 1/T$, где T — длительность символа.

В рассматриваемом варианте также можно формировать информационные созвездия, но отображаемые на концентрических окружностях, где радиус есть информация об огибающей текущего вейвлета (амплитуде), и дискретных углах, где радиус есть информация о псевдофазе или о линейном смещении по дуге окружности с этим радиусом.

Методы анализа (приема) узкополосного сигнала

Алгоритм анализа сигнала содержит несколько этапов. На первом этапе необходимо решить задачу синхронизации: поскольку сигнал финитный и периодический, необходимо выявить начало и конец текущего периода. Далее оценивается количество информационных кадров длительности T . Затем на каждом кадре следует оценить уровни принятых

ковлета $Y = B_c^T \cdot S$ и сивлета $X = B_s^T \cdot S$ относительно опорных.

В матричном виде анализ сигнала, принятого из канала связи в каждом кадре с информацией, содержащейся в псевдофазе, может быть выполнен так:

$$U = \text{atan2} [Y, X].$$

Или с учетом ортогональности вейвлетов в комплексном представлении:

$$U = \arg [Y + j \cdot X].$$

Если информация, кроме псевдофазы, содержится и в огибающей вейвлета (амплитуде), то ее оценка может быть получена так:

$$Og = \sqrt{X^2 + Y^2}.$$

Заключение

Как было показано ранее, на интервале времени $T = 2/f_n = 6,667$ мс можно сформировать $m = 8$ пар вейвлетов (ковлетов и сивлетов) и информация может содержаться в их огибающей и псевдофазе, поэтому канальную скорость передачи информации в такой системе можно вычислить как

$$V_k = \frac{m}{T} \log_2 (u_a \cdot u_f),$$

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ходаковский В. А., Коротченко В. Д. Синтез ортогонального базиса на конечном временном интервале для цифровой обработки сигналов с ограниченным спектром // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 2 (42). С. 71–82. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-71-82
2. Ходаковский В. А., Коротченко В. Д. Анализ и синтез ортогонального базиса на конечном временном интервале для цифровой обработки сигналов с ограниченным спектром // Современное состояние и перспективы развития инфокоммуникационных сетей связи специального назначения: материалы научно-практической конференции (Санкт-Петербург, Россия, 27 марта 2025 г.). СПб.: Военная академия связи, 2025. С. 234–238.
3. Коротченко В. Д. Реализация метода увеличения точности восстановления сигналов, синтезированных с использованием ортогонального базиса на конечном временном интервале / В. Д. Коротченко; науч. рук. В. А. Ходаковский // МНПК-2025: материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции (Казань, Россия, 27–28 мая 2025 г.). Казань: ИП Сагеев А. Р., 2025. С. 169–172.
4. Коротченко В. Д. Повышение спектральной эффективности узкополосного канала связи на основе ортогонального базиса из финитных функций // Сборник докладов 81-й научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященной Дню радио (Санкт-Петербург, Россия, 20–24 апреля 2026 г.). Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2026. С. 114–116.
5. Коротченко В. Д., Ходаковский В. А. Увеличение скорости передачи данных в телеметрических системах с электромагнитным каналом связи за счет применения ортогональных базисных функций // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2026. № 2 (631). С. 21–26.

где u_a — количество уровней амплитуды;

u_f — количество уровней псевдофазы.

Таким образом, в канале связи ТЧ при использовании созвездий 2×8 — $u_a = 2$, $u_f = 8$, $m = 8$, $T = 6,667$ мс — скорость передачи информации может составить $V_k = 4776$ бит/с, а удельная — $V_u = 1,5$ бит/с/Гц, что заметно превышает возможности канала при использовании традиционных методов модуляции сигналов; при использовании созвездий 8×32 достижимая канальная скорость передачи может составлять $V_k = 9595$ бит/с, а удельная скорость может превысить 3 бит/с/Гц.

Разумеется, для подтверждения этих возможностей необходимо провести исследование на математических моделях в условиях воздействия аддитивного шума, что и будет являться направлением дальнейших исследований.

Кроме того, отметим, что фундаментальные основы затронутых в настоящей статье проблем изложены в классических работах [6, 9, 10]. В числе современных исследований можно отметить работы [11–19], в которых предлагаются результаты, связанные с тематикой настоящей статьи. Их результаты также могут быть полезны при выборе направлений дальнейших исследований.

6. Котельников В. А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук. 2006. Т. 176, № 7. С. 762–770. DOI: 10.3367/UFNr.0176.200607h.0762
7. Коротченко В. Д., Ходаковский В. А. Модель синтеза ортогонального базиса на основе импульсной характеристики идеального полосового фильтра // Железнодорожный транспорт и технологии (РТТ–2025): сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Екатеринбург, Россия, 29–30 октября 2025 г.). Екатеринбург: УрГУПС, 2026. С. 100–104.
8. Коротченко В. Д. Модели синтеза ортогональных базисных функций на основе характеристики идеального полосового фильтра // Век качества. 2026. № 1. С. 249–263.
9. Nyquist H. Certain Topics in Telegraph Transmission Theory // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1928. Vol. 47, iss. 2. Pp. 617–644. DOI: 10.1109/T-AIEE.1928.5055024
10. Shannon C. E. Communication in the Presence of Noise // Proceedings of the Institute of Radio Engineers. 1949. Vol. 37, no. 1. Pp. 10–21. DOI: 10.1109/jrproc.1949.232969
11. Trade-off Between Spectral Efficiency Increase and PAPR Reduction When Using FTN Signaling: Impact of Non Linearities / J.-A. Lucciardi [et al.] // Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), (Kuala Lumpur, Malaysia, 22–27 May 2016). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. 7 p. DOI: 10.1109/ICC.2016.7510842
12. Transmitter Architecture for Faster-Than-Nyquist Signaling Systems / D. Dasalukunte [et al.] // Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), (Taipei, Taiwan, 24–27 May 2009). Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. Pp. 1028–1031. DOI: 10.1109/ISCAS.2009.5117934
13. Mazo J. E. Faster-Than-Nyquist Signaling // Bell System Technical Journal. 1975. Vol. 54, iss. 8. Pp. 1451–1462. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1975.tb02043.x
14. Prlja A., Anderson J. B. Reduced-Complexity Receivers for Strongly Narrowband Intersymbol Interference Introduced by Faster-Than-Nyquist Signaling // IEEE Transactions on Communications. 2012. Vol. 60, iss. 9. Pp. 2591–2601. DOI: 10.1109/TCOMM.2012.070912.110296
15. Han F.-M., Jin M., Zou H.-X. Binary Symbol Recovery Via ℓ_∞ Minimization in Faster-Than-Nyquist Signaling Systems // IEEE Transactions on Signal Processing. 2014. Vol. 62, iss. 20. Pp. 5282–5293. DOI: 10.1109/TSP.2014.2347920.
16. Самус В. М. Использование ортогональных преобразований для получения сигнальных последовательностей с новыми автокорреляционными и спектральными характеристиками // Современная наука и инновации. 2023. No. 3 (43). С. 19–24. DOI: 10.37493/2307-910X.2023.3.2
17. Wenkui L. Noncoherent Data Transfer by Using Orthogonal Noise Signals // Synchroinfo Journal. 2024. Vol. 10, no. 2. Pp. 44–50. DOI: 10.36724/2664-066X-2024-10-2-44-50
18. Коржик В. И., Биккенин Р. Р. Система радиосвязи с широкополосными сигналами в условиях присутствия ретранслированных помех // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11, № 1. С. 26–33. DOI: 10.31854/1813-324X-2025-11-1-26-33.
19. Ерунов А. А. Методы построения ортогональных базисов для цифровой обработки сигналов // Известия института инженерной физики. 2024. № 4 (74). С. 23–34.

Дата поступления: 18.08.2026

Решение о публикации: 28.08.2026

Information Transmission in a Voice-Frequency Channel Without Using a Nonlinear Modulation Operation

Valentin A. Khodakovsky

— Dr. Sci. in Engineering, Full Professor. Professor of the “Information Technology and IT Security” Department. Research interests: mathematical modeling, information systems, big data processing, random processes, signal processing and synthesis. E-mail: hva1104@mail.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Khodakovsky V. A. Information Transmission in a Voice-Frequency Channel Without Using a Nonlinear Modulation Operation, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 3 (47), pp. 93–103. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-347-93-103 (In Russian)

Abstract. *A method for transmitting information over a narrow-band communication channel without a nonlinear modulation operation is described. **Purpose:** is to increase the specific transmission rate of information by using cyclic finite basic functions as a carrier: a frequency and a frequency (pulse analogues of cosine and sine) synthesized for a given communication channel. The nonlinear modulation operation has been replaced by a linear operation of weighted summation of basic functions having a spectrum exactly corresponding to the band of the dedicated communication channel. The information is contained in a vector of weights. **Methods:** mathematical modeling of the processes of orthogonal media synthesis, information input by multiplying the base matrix by the information vector during transmission and the reverse operation of multiplying the transposed base matrix by the vector of the received signal during message reception. **Results:** mathematical modeling of a communication channel in the presence of noise shows the possibility of approaching the Shannon limit in terms of specific transmission rate with a signal-to-noise ratio close to 1. The limiting estimates of the information transfer rate for a new method of information input into a narrowband signal are given. **Practical significance:** the achieved result can be implemented in any radio engineering systems associated with the use of narrow-band signals in various wave ranges from acoustic to light.*

Keywords: *matrix operations, covariance matrix, basic orthogonal functions, circulant matrices*

REFERENCES

1. Khodakovsky V. A., Korotchenko V. D. Sintez ortogonalnogo bazisa na konechnom vremennom intervale dlya tsifrovoy obrabotki signalov s ogranichennym spektrom [Orthogonal Basis Synthesis at a Finite Time Interval for Digital Signal Processing with Limited Spectrum], *Intellektualnye tekhnologii na transporte [Intellectual Technologies on Transport]*, 2025, no. 2 (42), pp. 71–82. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-242-71-82 (In Russian)
2. Khodakovsky V. A., Korotchenko V. D. Analiz i sintez ortogonalnogo bazisa na konechnom vremennom intervale dlya tsifrovoy obrabotki signalov s ogranichennym spektrom [Analysis and Synthesis of a Finite-Time Orthogonal Basis for Digital Processing of Spectrum-Limited Signals], *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya infokommunikatsionnykh setey svyazi spetsialnogo naznacheniya: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Current State and Prospects of Development of Special-Purpose Infocommunication Networks: Proceedings of the Scientific and Practical Conference]*, Saint Petersburg, Russia, March 27, 2025. Saint Petersburg, Military Telecommunications Academy, 2025, pp. 234–238. (In Russian)

3. Korotchenko V. D. Realizatsiya metoda uvelicheniya tochnosti vosstanovleniya signalov, sintezirovannykh s ispolzovaniem ortogonalnogo bazisa na konechnom vremennom intervale [Implementation of a Method for Increasing the Accuracy of Reconstructing Signals Synthesized Using an Orthogonal Basis Over a Finite Time Interval], *MNPK-2025: materialy Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [MNPK-2025: materials of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference], Kazan, Russia, May 27–28, 2025. Kazan, IP Sagiev A. R., 2025, pp. 169–172. (In Russian)
4. Korotchenko V. D. Povyshenie spektralnoy effektivnosti uzkopolosnogo kanala svyazi na osnove ortogonalnogo bazisa iz finitnykh funktsiy [Improving Spectral Efficiency of a Narrowband Communication Channel Using an Orthogonal Basis of Finite Functions], *Sbornik dokladov 81-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Sankt-Peterburgskogo NTO RES im. A. S. Popova* [Collection of reports of the 81st Scientific and Technical Conference of the St. Petersburg Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications named after A. S. Popov], Saint Petersburg, Russia, April 20–24, 2026. Saint Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 2026, pp. 114–116. (In Russian)
5. Korotchenko V. D., Khodakovskiy V. A. Uvelichenie skorosti peredachi dannykh v teletricheskikh sistemakh s elektromagnitnym kanalom svyazi za schet primeneniya ortogonalnykh bazisnykh funktsiy [Increase of the Data Transmission Rate in Telemetry Systems Supplied by Electromagnetic Communication Channels at the Expense of Orthogonal Basis Functions Application], *Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK* [Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex], 2026, no. 2 (631), pp. 21–26. (In Russian)
6. Kotelnikov V. A. On the Transmission Capacity of “Ether” and Wire in Electric Communications], *Physics-Uspekhi* (Advances in Physical Sciences), 2006, vol. 49, no. 7, pp. 736–744. DOI: 10.1070/PU2006v049n07ABEH006160
7. Korotchenko V. D., Khodakovskiy V. A. Model sinteza ortogonalnogo bazisa na osnove impulsnoy kharakteristiki idealnogo polosovogo filtra [An Orthogonal Basis Synthesis Model Based on the Impulse Response of an Ideal Bandpass Filter], *Zheleznodorozhnyy transport i tekhnologii (RTT-2025): sbornik trudov V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Railway Transport and Technology (RTT-2025): Proceedings of the 5th All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation], Yekaterinburg, Russia, October 29–30, 2025. Yekaterinburg, Ural State Transport University, 2026, pp. 100–104. (In Russian)
8. Korotchenko V. D. Modeli sinteza ortogonalnykh bazisnykh funktsiy na osnove kharakteristiki idealnogo polosovogo filtra [Models for the Synthesis of Orthogonal Basis Functions Based on the Characteristics of an Ideal Band-Pass Filter], *Vek kachestva* [Age of Quality], 2026, no. 1, pp. 249–263. (In Russian)
9. Nyquist H. Certain Topics in Telegraph Transmission Theory, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1928, vol. 47, iss. 2, pp. 617–644. DOI: 10.1109/T-AIEE.1928.5055024
10. Shannon C. E. Communication in the Presence of Noise, *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 1949, vol. 37, no. 1, pp. 10–21. DOI: 10.1109/jrproc.1949.232969
11. Lucciardi J.-A., et al. Trade-off Between Spectral Efficiency Increase and PAPR Reduction When Using FTN Signaling: Impact of Non Linearities, *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, May 22–27, 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016, 7 p. DOI: 10.1109/ICC.2016.7510842
12. Dasalukunte D., et al. Transmitter Architecture for Faster-Than-Nyquist Signaling Systems, *Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Taipei, Taiwan, May 24–27, 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009, pp. 1028–1031. DOI: 10.1109/ISCAS.2009.5117934
13. Mazo J. E. Faster-Than-Nyquist Signaling, *Bell System Technical Journal*, 1975, vol. 54, iss. 8, pp. 1451–1462. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1975.tb02043.x
14. Prlja A., Anderson J. B. Reduced-Complexity Receivers for Strongly Narrowband Intersymbol Interference Introduced by Faster-Than-Nyquist Signaling, *IEEE Transactions on Communications*, 2012, vol. 60, iss. 9, pp. 2591–2601. DOI: 10.1109/TCOMM.2012.070912.110296

15. Han F.-M., Jin M., Zou H.-X. Binary Symbol Recovery Via ℓ_∞ Minimization in Faster-Than-Nyquist Signaling Systems, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, vol. 62, iss. 20, pp. 5282–5293. DOI: 10.1109/TSP.2014.2347920
16. Samus V. M. Ispolzovanie ortogonalnykh preobrazovaniy dlya polucheniya signalnykh posledovatel'nostey s novymi avtokorrelyatsionnymi i spektralnymi kharakteristikami [Using Orthogonal Transformations to Obtain Signal Sequences with New Autocorrelation and Spectral Characteristics], *Sovremennaya nauka i innovatsii [Modern Science and Innovations]*, 2023, no. 3 (43), pp. 19–24. DOI: 10.37493/2307-910X.2023.3.2 (In Russian)
17. Wenkui L. Noncoherent Data Transfer by Using Orthogonal Noise Signals, *Synchroinfo Journal*, 2024, vol. 10, no. 2, pp. 44–50. DOI: 10.36724/2664-066X-2024-10-2-44-50
18. Korzhik V. I., Bikkenin R. R. Sistema radiosvyazi s shirokopolosnymi signalami v usloviyakh prisutstviya retranslirovannykh pomekh [Wireless System Using Spread Spectrum Signals under the Conditions of Possible Jamming by Retransmitted Interference], *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi [Proceedings of Telecommunication Universities]*, 2025, vol. 11, no. 1, pp. 26–33. DOI: 10.31854/1813-324X-2025-11-1-26-33 (In Russian)
19. Erunov A. A. Metody postroeniya ortogonalnykh bazisov dlya tsifrovoy obrabotki signalov [Methods for Constructing Orthogonal Bases for Digital Signal Processing], *Izvestiya instituta inzhenernoy fiziki [Izvestia of the Institute of Engineering Physics]*, 2024, no. 4 (74), pp. 23–34. (In Russian)

Received: August 18, 2026

Accepted: August 28, 2026