

ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№1(41)/2026

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал
№ 1 (41)



EDITORIAL BOARD

Ablameyko S.V.
 Arshinskiy L.V.
 Boukhanovsky A.V.
 Bychkov I.V.
 Woern H.
 Voevodin V.V.
 Wolfengagen V.E.
 Gornov A.Y.
 Gribova V.V.
 Groumpos P.
 Zorina T.G.
 Kazakov A.L.
 Kalimoldaev M.N.
 Karpenko A.P.
 Komendantova N.P.
 Kureichik V.V.
 Lis R.
 Marchenko M.A.
 Massel L.V.
 Moskvichev V.V.
 Ovtcharova J.
 Popov G.T.
 Sidorov D.N.
 Smirnov S.V.
 Stennikov V.A.
 Stylios C.
 Taratukhin V.V.
 Khamisov O.V.
 Hodashinsky I.A.
 Chubarov L.B.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
 Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
 Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
 Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Вёрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
 Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
 Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
 Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Грибова В.В., чл.-корр. РАН, д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
 Грумπος П., Греция, University of Patras
 Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси
 Казаков А.Л., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
 Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
 Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, ПАСА
 Курейчик В.В., д.т.н., профессор, Таганрог, ЮФУ
 Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology
 Марченко М.А. д.ф.-м.н., профессор РАН, Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН
 Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, ФИЦ ИВТ
 Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
 Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
 Сидоров Д.Н., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
 Стенников В.А., академик РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
 Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster
 Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
 Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ФИЦ ИВТ

EXECUTIVE EDITORIAL

Chief Editor Massel L.V. Главный редактор
 Editor Tuktarova P.A. Редактор
 Editor Gaskova D.A. Редактор
 Editor Kuzmin V.R. Редактор
 Editor Massel A.G. Редактор
 Tech. Editor Popova M.D. Техн. редактор
 Designer Pesterev D.V. Дизайнер

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Массель Л.В. д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Туктарова П.А. к.э.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Гаськова Д.А. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Кузьмин В.Р. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Массель А.Г. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Попова М.Д. Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Пестерев Д.В. Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
 Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
 (ИСЭМ СО РАН)

Адрес учредителя, издателя и редакции
 664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
 Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Сайт журнала - <https://www.imt-journal.ru/>

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.
 Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы
 основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (по
 состоянию на 29.03.2022) по научным специальностям 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.5; 2.4.5.
 Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 73539 от 31.08.2018.

Отпечатано в типографии «Дубль Принт»

СС BY

Адрес типографии: 664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14

© Издательство ИСЭМ СО РАН

*Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021 г.

Цена свободная (12+)

Дата выхода 05.03.2026 г. Тираж 50 экз.

Методологические аспекты информационных и математических технологий	
Бетеров И.И., Чэнь Цзюньси, Ложкина Е.А. Квантовые вычисления на перспективных платформах	5
Лукинова О.В. Обзор современного состояния понимания концепта «автономность технических средств»	23
Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта	
Массель Л.В., Цыбиков А.Р., Щукин Н.И. Методы построения умных цифровых двойников для проектирования возобновляемых источников энергии	43
Бачурин Р.М., Захарова И.Г. Интеллектуальная система анализа данных процесса пиролиза биомассы	59
Китаева О.И. Применение интеллектуального анализа данных для поиска взаимосвязи между результатами ЕГЭ и академической успеваемостью студентов ВУЗа	68
Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике	
Крюков А.В., Середкин Д.А., Воронина Е.В. Моделирование электромагнитных полей на трассах линий электропередачи, оснащенных тросовыми экранами	79
Колосок И.Н., Коркина Е.С. Роль задачи оценивания состояния в обеспечении ситуационной осведомленности диспетчера ИЭС	91
Лебедев К.В., Бойко Е.А., Куличкин А.П., Лойко В.П., Бобров А.В., Новицкий Д.А., Посохов Ю.М. Алгоритмическое BIM-моделирование поверхностей нагрева паровых котлов тепловых электростанций	104
Цифровая экономика и управление	
Улыбин Т.Т. Совершенствование управления жизненным циклом информационной инфраструктуры предприятия на основе агрегированной оценки с учётом структуры и критичности компонентов	123
Митрофанова Т.В., Христофорова А.В. Цифровой портрет регионального развития: анализ грантовых проектов методами LDA и BERTopic	136
Сидоренко Н.А., Яркова О.Н. Алгоритм формирования стратегии управления рисками в строительных проектах	150
Баймаков А.А., Иваньо Я.М., Федурин Н.И. Моделирование эффективности деятельности университета с использованием электронной информационно-образовательной среды	164
Программные системы и комплексы	
Степанов А.В. О программной реализации метода Монте-Карло для оценивания доверительных полос линейной регрессии	180
Кораблева М.Д., Бекенева Я.А. Программные средства для оценки выполнения физических упражнений	189
Боровский А.В., Мосоркин Ф.Э. Разработка программы «Калькулятор лингвиста»	199
Памяти Бахвалова С.В.	207

	Content
Methodological aspects of information and mathematical technologies	
Beterov I.I., Chen Junxi, Lozhkina E.A. Quantum computing on perspective platforms	5
Lukinova O.V. Overview of the current state of understanding the concept of “autonomy of technical means”	23
Methods, technologies and applications of artificial intelligence	
Massel L.V., Tsybikov A.R., Shchukin N.I. Methods for building Smart Digital Twins of renewable energy	43
Bachurin R.M., Zakharova I.G. Intelligent data analysis system for the biomass pyrolysis process	59
Kitaeva O.I. The use of data mining to find the relationship between the results of the unified state exam and the academic performance of university students	68
Mathematical, information and intelligent technologies in energy	
Kryukov A.V., Sereдкиn D.A., Voronina E.V. Modeling of electromagnetic fields on power transmission line routes equipped with shield wires	79
Kolosok I.N., Korkina E.S. The role of the State Estimation problem in ensuring situational awareness of the Smart Grid operator	91
Lebedev K.V., Boiko E.A., Kulichkin A.P., Loiko V.P., Bobrov A.V., Novitsky D.A., Posokhov Yu.M. Algorithmic BIM modeling of steam boiler heating surfaces of power plants	104
Digital Economy and Management	
Ulybin T.T. Improving the lifecycle management of an enterprise's information infrastructure based on an aggregated assessment, taking into account the structure and criticality of the components	123
Mitrofanova T.V., Khristoforova A.V. Digital profile of regional development: analysis of grant projects using LDA and BERTopic	136
Sidorenko N.A., Yarkova O.N. Algorithm for developing a risk management strategy in construction projects	150
Baymakov A.A., Ivanyo Ya.M., Fedurina N.I. Modeling the effectiveness of university activities using an electronic information and educational environment	164
Software systems and complexes	
Stepanov A.V. On the software implementation of the Monte Carlo method for estimating confidence bands of linear regression	180
Korableva M.D., Bekeneva Ya.A. Software tools for assessing exercise performance	189
Borovsky A.V., Mosorkin F.E. Development of the "Linguist's Calculator" program	199
In memory of S.V. Bakhvalov	207

Методологические аспекты информационных и математических технологий

УДК 530.145.83

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.001

Квантовые вычисления на перспективных платформах

Бетеров Илья Игоревич^{1,2}, Чэнь Цзюньси^{1,2} Ложкина Екатерина Андреевна²

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Россия, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет, Россия, Новосибирск,

beterov@isp.nsc.ru

Аннотация. В работе представлен краткий обзор современного состояния дел в области квантовых вычислений. В последние годы в этой сфере исследований наблюдается стремительный прогресс, в первую очередь в развитии экспериментальных методов управления состояниями многочастичных квантовых систем. В то же время, вопрос о практическом применении квантовых вычислений остается открытым. Наиболее перспективные направления, где такие приложения могут появиться уже в ближайшие годы – это решение задач квантовой химии, материаловедение, различные оптимизационные задачи. Большой интерес научной общественности вызывают современные экспериментальные работы по реализации различных квантовых алгоритмов с использованием квантовых процессоров промежуточного масштаба с десятками и сотнями кубитов – двухуровневых квантовых систем, которые являются основными логическими элементами квантового компьютера. Это хорошо видно по результатам библиометрического анализа, проведенного с помощью Google Scholar и ChatGPT.

Экспериментальная реализация квантовых вычислений в настоящее время характеризуется соревнованием нескольких физических платформ, среди которой лидирует сверхпроводящая платформа, что было отмечено Нобелевской премией по физике в 2025 году. В то же время, альтернативные платформы – фотоны, ионы, нейтральные атомы – обладают рядом потенциальных преимуществ. Наиболее значимое направление развития экспериментальных квантовых вычислений в последние годы – это квантовая коррекция ошибок, которая должна увеличить глубину квантовых алгоритмов и позволить реализовать наиболее сложные универсальные квантовые алгоритмы. Основные принципы квантовой коррекции ошибок и реализации поверхностного кода, наилучшим образом соответствующего архитектуре современных квантовых процессоров, приведены в статье.

На базе существующих сверхпроводящих квантовых процессоров реализован облачный доступ, позволяющий исследователям проводить как численное моделирование, так и эксперименты по реализации квантовых вычислений. Для этого широко используется ставшая де-факто стандартом библиотека IBM Qiskit. В качестве примера в работе приведена демонстрация элементов поверхностного кода квантовой коррекции ошибок, реализованная с помощью больших языковых моделей.

Ключевые слова: квантовые вычисления, квантовые компьютеры, квантовая коррекция ошибок

Цитирование: Бетеров И.И. Квантовые вычисления на перспективных платформах / И.И. Бетеров, Ц. Чэнь, Е.А. Ложкина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1 (41). – С. 5-22 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.001.

Введение. В честь столетия появления понятия квантовой механики [1] 2025 год был объявлен ЮНЕСКО Международным годом квантовой науки и технологий [2]. Квантовая механика опирается на представления о дискретности элементарных процессов поглощения энергии, неопределенности – отсутствия у квантовых частиц физической траектории, случайности измерения физических величин. Сегодня экспериментальная квантовая физика переживает расцвет, поскольку появились возможности управления квантовыми состояниями многочастичных квантовых систем, что было отмечено тремя Нобелевскими премиями по физике в 2012, 2022 и 2025 годах [3]. Потенциальные практические приложения таких исследований сегодня обычно называют квантовыми технологиями. К квантовым технологиям, как правило, относят квантовые вычисления, квантовые коммуникации и квантовую сенсорику. При этом квантовые вычисления и квантовые коммуникации объединяются понятием квантовой информатики. В целом, к квантовой информатике можно

отнести те методы обработки информации, которые не имеют аналогов, реализуемых на обычных компьютерах.

Экспериментальный прогресс в области квантовых технологий в последние годы – это создание оптоволоконных и спутниковых систем квантовой связи, значительное увеличение масштаба квантовых регистров на основе различных физических платформ, а также значительное увеличение точности логических вентилях, выполняемых с отдельными кубитами – двухуровневыми квантовыми системами, на которых основаны квантовые компьютеры. Несмотря на то, что практических приложений квантовых компьютеров еще не имеется, темп научно-технического прогресса в этой области поражает воображение. Обзоры современного состояния дел успевают полностью устареть приблизительно за один год. Цель статьи – кратко рассмотреть перспективы квантовых вычислений на современном этапе.

1. Состояние дел в области квантовых вычислений: экспертные оценки. Работы в области квантовых вычислений привлекают большое внимание научной общественности и наиболее значимых экспертных сообществ, в том числе Нобелевского комитета. В последние годы развитие квантовых вычислений во многом сместилось из академических организаций в индустриальный сектор. Исследовательские центры в области квантовых вычислений появились в крупнейших ИТ-компаниях, включая Google, IBM, Microsoft. Не случайно один из лауреатов Нобелевской премии по физике 2025 года Мишель Деворе является сотрудником Google [4], а другой лауреат, Джон Мартинис, длительное время руководил исследовательским центром Google в области квантовых вычислений [5]. Именно компания Google в 2019 году впервые продемонстрировала квантовое превосходство – возможность с помощью квантового компьютера решить математическую задачу, которая не может быть эффективно решена даже с использованием суперкомпьютеров [6]. Для этого использовался квантовый процессор Sycamore, содержащий 54 кубита. Это число не выглядит таким уж большим, но классическое моделирование квантовых вычислений требует экспоненциального роста объема памяти с увеличением числа кубитов. При этом параллельное решение этой задачи с использованием большого числа процессоров, которое обычно, делается на современных суперкомпьютерах, оказывается малоэффективным. Это позволяет надеяться на появление практически значимых квантовых алгоритмов.

В то же время, имеется ряд обстоятельств, сдерживающих развитие квантовых вычислений. Во-первых, квантовые алгоритмы демонстрируют экспоненциальное преимущество для очень узкого набора задач, например, таких, как факторизация больших чисел [7]. Хотя для многих других NP-трудных задач также разработаны квантовые алгоритмы, они не обеспечивают столь существенного превосходства. То же самое относится и к различным оптимизационным задачам. Например, коммерческий квантовый процессор D-Wave изначально был разработан для решения задач квантового отжига. Но корректное сравнение его производительности с обычными процессорами оказалось достаточно сложным, и его превосходство продолжает быть предметом дискуссий [8]. Во-вторых, для квантовых компьютеров необходима постоянная коррекция ошибок, поскольку квантовые состояния быстро разрушаются. Это требует увеличения числа кубитов, что достаточно сложно технически, и может быть эффективно реализовано лишь на нескольких физических платформах – таких, как сверхпроводники и ультрахолодные нейтральные атомы.

Одним из наиболее известных экспертов в области квантовых вычислений является физик-теоретик из Калифорнийского технологического университета Джон Прескилл. Ему принадлежит понятие Noisy Intermediate Scale Quantum technology (NISQ) – квантовые технологии промежуточного масштаба с высоким уровнем шумов [9]. Основная идея заключалась в том, что возможности индивидуального управления квантово-запутанными

состояниями многочастичных квантовых систем появилась впервые в истории современной физики.

Развитие этой работы – недавняя публикация, посвященная квантовым преимуществам [10]. Необходимо уметь отличать преимущества для решения практических задач, связанных с принципиальными отличиями квантовой механики от классической, от псевдо-преимуществ, связанных с недостаточно оптимальным выбором классического подхода к решению конкретной задачи. Это достаточно просто в отношении таких задач, как факторизация больших чисел, на отсутствие эффективных классических алгоритмов решения которой базируются стандарты информационной безопасности. В то же время, квантовый алгоритм факторизации реализуется за полиномиальное время по отношению к размеру массива входных данных [7]. Можно утверждать, что потенциальные преимущества существуют и для других задач, включая приближенные оптимизационные алгоритмы, поиск собственных значений унитарного оператора, дискретное логарифмирование [11,12]. Оценка квантовых преимуществ – нетривиальная проблема, особенно в условиях, когда постоянно разрабатываются все новые алгоритмы для решения различных математических задач, включая моделирование сложных квантовых систем. В некоторых случаях квантовое преимущество может иметь эмпирический характер, например, когда эффективный квантовый алгоритм уже существует, а эффективный классический еще предстоит разработать. Это относится в первую очередь к задачам моделирования квантовых систем, что важно для приложений в материаловедении, физике конденсированного состояния и квантовой химии. В целом, квантовая химия является областью знания, которая должна выиграть наиболее существенно от появления квантовых компьютеров.

По оценкам исследователей из компании BlueQubit, преимущественно выпускников Стенфордского университета, возможные практические приложения квантовых компьютеров на современном этапе ожидаются в первую очередь в следующих областях [13]:

- Разработка новых лекарств. С помощью квантовых компьютеров предполагается моделировать химические связи и пути химических реакций, что позволит ускорить разработку новых лекарств, для которых сейчас требуется перебирать химические компоненты и возможные реакции в лабораториях.
- Разработка новых материалов. За счет точного моделирования квантовых состояний электронов в твердотельных системах, невозможного на классическом компьютере, ожидается разработка новых сверхпроводящих материалов, легких и прочных сплавов, солнечных панелей.
- Моделирование финансовых рынков. Анализ состояния рынка является чрезвычайно сложным, поскольку рынок описывается огромным числом параметров и обладает чрезвычайно высоким уровнем неопределенности. Анализ рынка с помощью квантовых компьютеров может стать важным инвестиционным инструментом.
- Технологии искусственного интеллекта. Задачи глубокого обучения являются экспоненциально сложными и требуют огромных вычислительных ресурсов. Квантовые компьютеры могут быть интересными для обработки естественного языка, распознавания изображений. Большой интерес представляют гибридные квантово-классические модели.
- Логистика. Квантовые компьютеры могут быть использованы для комбинаторной оптимизации, что открывает возможности для решения множества сложных логистических задач.

Разумеется, к этому перечню перспективных направлений следует относиться с известной осторожностью. Хотя он хорошо показывает основные точки приложения сил, ни

одно из этих приложений пока не является гарантированным, в отличие от, например, хорошо известной задачи факторизации больших чисел.

2. Библиометрические оценки. Для краткого библиометрического анализа публикаций в период 2020-2025 была использована база данных Google Scholar с сортировкой по цитированию с помощью библиотеки `sortgs` для языка Python. Наиболее цитируемые работы последних лет – экспериментальная демонстрация квантового превосходства с использованием фотонного процессора, обзор по квантовой вычислительной химии, экспериментальная демонстрация квантового алгоритма, имеющего потенциал практического применения на сверхпроводящем компьютере IBM, более убедительная по сравнению с первым результатом Google демонстрация квантового превосходства на сверхпроводящем процессоре, реализация бозонного сэмпинга в фотонной системе, обзор квантовых алгоритмов в области квантовой химии и квантового материаловедения, новый квантовый алгоритм решения термодинамических задач, описание библиотеки Qiskit для квантовых вычислений, обзор квантовых вычислений с нейтральными атомами, материаловедческий анализ перспективных платформ для квантовых вычислений.

Альтернативный анализ наиболее цитируемых работ был проведен с помощью ChatGPT 5.2 с последующей верификацией результатов в содержательном плане. Этот перечень имеет большое число пересечений с результатами, полученными непосредственно с помощью Google Scholar. В то же время, в нем дается краткая характеристика значимости каждой работы и ее влияния на состояние дел в области знания, приведенная в Таблице 1.

Таблица 1. Наиболее цитируемые работы в области квантовых вычислений с 2020 года, согласно ChatGPT 5.2

Год	Статья	Журнал	Почему цитируется
2020	McArdle et al., “Quantum computational chemistry” [14]	Reviews of Modern Physics	Обзор алгоритмов квантовых вычислений для задач квантовой химии, включая вариационные методы и квантовые симуляторы. Обзор широко цитируется в работах, посвященных вариационным методам.
2020	Kjaergaard et al., “Superconducting Qubits: Current State of Play” [15]	Annual Review of Condensed Matter Physics	Стандартизированный обзор физических характеристик сверхпроводящих кубитов (время когерентности, квантовые вентили, чтение состояний, архитектура процессора)
2020	Zhong et al., “Quantum computational advantage using photons” [16]	Science	Ключевой эксперимент по демонстрации квантового превосходства на примере бозонного сэмпинга, широко цитируется в работах, посвященных квантовому превосходству
2021	Cerezo et al., “Variational quantum algorithms” [17]	Nature Reviews Physics	Классический обзор вариационных квантовых алгоритмов (оптимизация, приложения)
2021	Wu et al., “Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor” [18]	Physical Review Letters	Убедительная демонстрация квантового превосходства с использованием сверхпроводящего квантового процессора, широко цитируется в работах, посвященных квантовому превосходству

2021	Endo et al., “Hybrid quantum-classical algorithms and quantum error mitigation” [19]	Journal of the Physical Society of Japan	Широко используется в работах, посвященных уменьшению влияния ошибок и в гибридных квантово-классических конфигурациях, а также в экспериментах с устройствами с высоким уровнем шумов
2022	Bharti et al., “Noisy intermediate-scale quantum (NISQ) algorithms” [20]	Reviews of Modern Physics	Обширный и широко цитируемый обзор квантовых алгоритмов, применимых в устройствах с высоким уровнем шумов, соображения по практическому использованию
2022	Tilly et al., “The variational quantum eigensolver: a review of methods and best practices” [21]	Physics Reports	Обзор наиболее эффективных методов вариационного поиска собственных значений, широко цитируется в публикациях по химии и материаловедению, а также используется при оценке характеристик и скорости алгоритмов
2022	Madsen et al., “Quantum computational advantage with a programmable photonic processor” [22]	Nature	Демонстрация квантового превосходства с использованием программируемого фотонного процессора, широко цитируется в публикациях по фотонике и используется в работах, посвященных сэмплингу и верификации результатов
2023	Google Quantum AI et al., “Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit” [23]	Nature	Флагманская работа по экспериментальной реализации поверхностного кода, широко цитируется в дорожных картах по квантовым алгоритмам и работах по реализации квантовой коррекции ошибок

Хорошо видно, что наиболее цитируемые работы в области квантовых вычислений посвящены экспериментальной реализации различных квантовых алгоритмов на небольшом числе физических платформ – сверхпроводящей и реже фотонной. Большой интерес научной общественности вызывают обзоры по квантовым алгоритмам и вопросы квантового превосходства. Это указывает на основные направления приложения усилий. Вместе с тем, следует отметить, что анализ цитируемости всегда имеет несколько запаздывающий характер, и наиболее значимые современные публикации следует оценивать скорее экспертным образом.

3. Основные принципы квантовых вычислений. Основой квантового компьютера является квантовый регистр, состоящий из квантовых битов (кубитов) – любых двухуровневых квантовых систем [24]. Любые хорошо различимые состояния кубита выбираются в качестве логического нуля и единицы. В качестве таких состояний могут рассматриваться разные энергетические уровни в атомах или ионах, или различные состояния квантованного электрического тока в сверхпроводниках, за исследования которого была присуждена Нобелевская премия 2025 года [3]. В квантовой физике широко используется предложенная Полем Дираком система обозначений для квантовых состояний в виде асимметричных скобок, например, $|0\rangle$ и $|1\rangle$, которые соответствуют логическим нулю и единице. Принципиальная разница с классическими битами информации состоит в том, что, в отличие от классического бита, квантовый бит может находиться в суперпозиции состояний $a|0\rangle + b|1\rangle$, где a и b – комплексные числа. В этом случае вероятность найти кубит в состоянии

$|0\rangle$ будет равна $|a|^2$, а вероятность обнаружить его в состоянии $|1\rangle$ будет $|b|^2$. При этом точно предсказать результат единичного измерения невозможно.

Эти же логические состояния могут быть обозначены векторами $|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ или $|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. В этом случае произвольное суперпозиционное состояние кубита будет выглядеть как $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$. С учетом того, что волновая функция определена с точностью до глобальной фазы, а сумма квадратов модулей коэффициентов a и b равна единице (условие нормировки), произвольное суперпозиционное состояние может быть записано как $\cos(\theta/2)|0\rangle + e^{i\varphi}\sin(\theta/2)|1\rangle$ и графически изображено в виде единичного вектора на сфере, которая называется сферой Блоха (рис. 1). Однокубитовые вентили обычно соответствуют вращению вектора вокруг заданной оси, поэтому их часто называют вращениями кубита.

Поскольку каждый кубит может находиться в двух состояниях одновременно, квантовый регистр, состоящий из n кубитов, может находиться в суперпозиции 2^n ортонормированных базисных состояний. Потенциально, это позволяет квантовому компьютеру с n кубитами проводить вычисления над 2^n числами одновременно. Но извлечь такое количество информации из вектора состояния невозможно. Поэтому такое преимущество, называемое квантовым параллелизмом, реализуется только косвенным образом в некоторых квантовых алгоритмах.

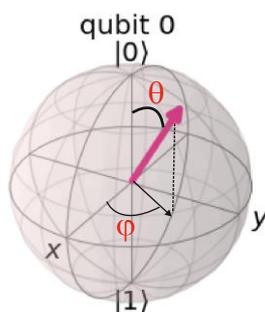


Рис. 1. Изображение состояния кубита на сфере Блоха

Квантовые алгоритмы выполняются путем преобразования состояний отдельных кубитов. Эти преобразования, по аналогии с логическими вентилями в классической информатике, называются квантовыми вентилями. При этом для квантовых алгоритмов введено понятие универсального набора квантовых вентилях, к которым могут быть сведены сколь угодно сложные алгоритмы.

Такие универсальные наборы обязательно включают простые логические вентили, которые выполняются над отдельными кубитами (однокубитовые вентили) и, что намного сложнее, над парами кубитов (двухкубитовые вентили). Поскольку двухкубитовые вентили требуют управления взаимодействием реальных физических систем, их намного сложнее реализовать с высокой точностью. Именно поэтому точность двухкубитовых вентилях рассматривается, как одна из важнейших характеристик любого квантового процессора, наряду с числом содержащихся в нем кубитов. Еще одной важной характеристикой является топология квантового процессора – могут ли выполняться двухкубитовые вентили между произвольными кубитами (как в ионных системах), или только между ближайшими соседями (многие реализации сверхпроводящих и атомных процессоров).

Действие вентиля X описывается матрицей Паули σ_x , умноженной на вектор состояния кубита. Таким образом, вентиль X описывает преобразование $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$, $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$, что эквивалентно классическому вентилю «Не». Но, в отличие от классического вентиля, квантовый вентиль может преобразовать произвольную квантовую суперпозицию состояний

кубита. Преобразование произвольной квантовой суперпозиции выглядит следующим образом: $a|0\rangle + b|1\rangle \rightarrow a|1\rangle + b|0\rangle$.

Вентиль Адамара не имеет классического аналога. Этот вентиль создает квантовые суперпозиции в соответствии с правилами $|0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ и $|1\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$. Его действие может быть описано матрицей Адамара, которую нужно умножить на вектор состояния:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Для реализации произвольного квантового алгоритма необходимо, помимо однокубитовых вентилях, уметь выполнять и двухкубитовые вентили, например, CNOT, изображенный на рис. 1. Этот вентиль аналогичен операции «Исключающее ИЛИ». При выполнении этого вентиля состояние контролируемого кубита $|t\rangle$ инвертируется в том случае, если контролирующий кубит $|c\rangle$ находился в состоянии $|1\rangle$. Состояние системы из двух кубитов преобразуется по правилам $|00\rangle \rightarrow |00\rangle$, $|01\rangle \rightarrow |01\rangle$, $|10\rangle \rightarrow |11\rangle$, $|11\rangle \rightarrow |10\rangle$. Матрица такого преобразования имеет вид:

$$CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

и описывает преобразование четырехмерных векторов состояний системы из двух кубитов.

С помощью вентиля CNOT можно создать квантово-запутанные состояния системы из двух кубитов. Такие состояния невозможно представить в виде произведения состояний отдельных кубитов. Впервые они были рассмотрены в известной статье Эйнштейна, Подольского и Розена в 1935 году [25]. За экспериментальные исследования квантово-запутанных состояний в 2022 году была присуждена Нобелевская премия по физике [3].

Мы рассмотрели отдельные логические вентили – элементарные блоки любого квантового алгоритма. Сами квантовые алгоритмы могут быть достаточно сложными. Выделяют несколько классов квантовых алгоритмов. Например, придуманный Питером Шором алгоритм факторизации больших чисел [7] основан на квантовом преобразовании Фурье – аналоге дискретного преобразования Фурье, широко использующегося в современной вычислительной математике. Другой распространенный класс алгоритмов – это алгоритмы поиска, позволяющие выделить одно квантовое состояние из множества.

4. Элементарная база квантовых вычислений. В 1995 году Давид Ди Винченцо сформулировал критерии [26], которым должна удовлетворять физическая система для создания квантового компьютера:

Масштабируемость: квантовый регистр должен состоять из большого (порядка 10^3 - 10^6) числа кубитов – двухуровневых квантовых систем.

Инициализация: перед началом квантовых вычислений нужно «стереть» начальное состояние квантового регистра и приготовить кубиты в заданное начальное состояние.

Устойчивость к декогерентизации: Состояния кубитов не должны разрушаться в течение длительного времени по сравнению с временем выполнения отдельных логических вентилях, что позволит выполнять квантовую коррекцию ошибок. При успешной коррекции ошибок ограничения на глубину алгоритмов, связанные с временем жизни квантового состояния регистра, снимаются.

Универсальный набор логических вентилях: необходимо выполнять однокубитовые и двухкубитовые квантовые вентили.

Измерение: необходимо измерить конечное состояние регистра с достаточно высокой точностью.

На рис. 2 схематически изображены некоторые перспективные физические платформы для квантовых вычислений. Основные принципы сверхпроводящего квантового процессора показаны на рис. 2 (а). Идея сверхпроводящего кубита была впервые предложена в 1999 году [27]. Сверхпроводящие кубиты основываются на эффекте Джозефсона, который заключается в способности электронов (а точнее, куперовских пар электронов) проникать через разрыв в сверхпроводящей электрической цепи. Сверхпроводящее кольцо с двумя джозефсоновскими контактами представляет собой сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство. Противоположные направления тока в сверхпроводящем кольце могут рассматриваться, как различные состояния сверхпроводящего кубита. Сверхпроводящие процессоры Google Sycamore и Willow представляют собой чипы, в которых каждый кубит (изображенный крестом на рисунке) соединяется с четырьмя ближайшими соседями с помощью специальных соединительных модулей (изображены прямоугольниками). Квантовый процессор IBM Condor состоит из 1121 кубитов [11]. Этот чип помещается в криостат, в котором охлаждается с помощью жидкого гелия.

Ионная платформа изображена на рис. 2(б) [28]. Эксперимент происходит в условиях сверхвысокого вакуума. Ионы захватываются в области между электродами, а затем с помощью лазерного излучения их движение «замораживается» за счет механического действия света. Образуется линейная цепочка ионов, которая может колебаться, как показано на рисунке в виде последовательности кадров – цепочка либо двигается целиком, либо, например, растягивается и сжимается. Через возбуждение таких колебаний можно выполнять двухкубитовые вентили для любой пары ионов в цепочке, даже если эти ионы находятся далеко друг от друга. Преимущество ионной платформы – отсутствие ограничений на взаимодействие далеких друг от друга кубитов и высокая точность двухкубитовых вентилей, а также относительная технологическая простота такой системы. Недостаток – увеличение числа кубитов в такой цепочке до более чем несколько десятков оказывается чрезвычайно трудным.

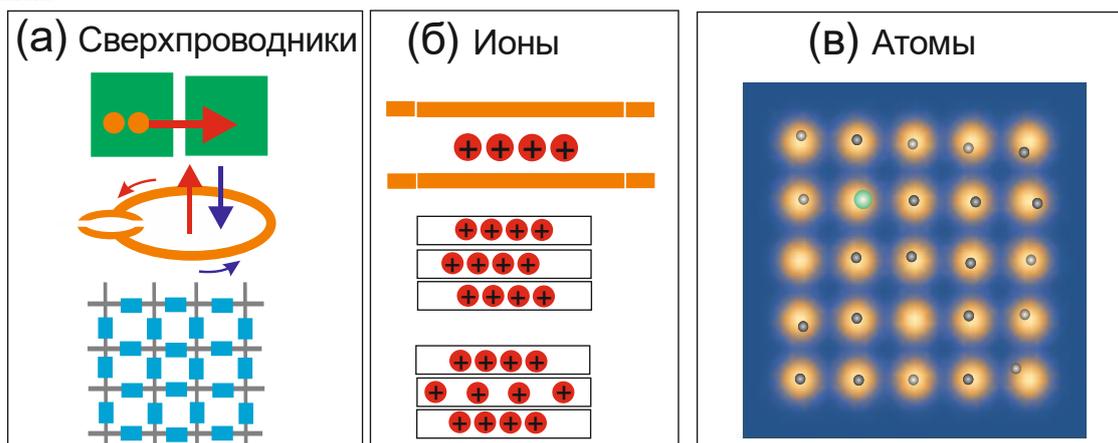


Рис. 2. (а) Сверхпроводящая платформа для квантовых вычислений, сверху вниз – переход Джозефсона, сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство (СКВИД), архитектура сверхпроводящего квантового процессора; (б) Ионная платформа для квантовых вычислений, сверху вниз – положительно заряженные ионы в ловушке, колебания цепочки ионов как целого, дышащая колебательная мода – растяжение и сжатие цепочки; (в) Атомная платформа для квантовых вычислений, изображены ультрахолодные атомы в массиве оптических пинцетов, показаны дефекты в массиве и переход атома в другое квантовое состояние в результате лазерного возбуждения

Атомная платформа изображена на рис. 2(в) [29]. Эксперимент также проводится в вакуумной камере или высоковакуумной стеклянной ячейке, в которой в небольшой концентрации присутствует газ каких-либо атомов (чаще всего щелочных или щелочноземельных металлов). Под действием лазерного излучения атомы «замораживаются», а затем захватываются в оптические пинцеты (Нобелевские премии 1997 и 2023 годов). После этого с помощью лазерного излучения выполняются квантовые вентили. Атомная платформа имеет практически неограниченные возможности масштабирования – уже сейчас продемонстрированы 6100 атомных кубитов [30]. В то же время, точные квантовые вентили между далекими атомами сделать довольно трудно. В отличие от ионов и сверхпроводящих кубитов, из-за потерь атомов в таких массивах быстро возникают дефекты, которые требуется заполнять. Как ионная, так и атомная платформа позволяют работать при комнатной температуре.

Список действующих в настоящее время квантовых процессоров включает несколько десятков сверхпроводящих систем (IBM, Google, Intel, Rigetti, Oxford Quantum Circuits, Chinese Academy of Sciences и др.), ионные (IonQ, Quantinuum), атомные системы (Atom Computing, QuEra), а также более экзотические – азотные вакансии в алмазах, фотонные системы, квантовые точки, ядерный магнитный резонанс [31].

С помощью ChatGPT 5.2 был проведен анализ наиболее значимых технологических достижений для различных физических платформ. Было предложено выбрать 1-2 публикации, имеющих первостепенное значение для развития каждой платформы, исключая статьи, уже отмеченные среди ранее приведенных высокоцитируемых публикаций. Результаты подбора приведены в Таблице 2. Следует отметить, что ограничение в 1-2 публикации для каждой платформы является довольно сложным для обработки. Потребовалось отдельно исключить из результатов поиска подборки публикаций по ключевым словам, со ссылками на Google Scholar. Некоторые ссылки потребовали обновления и уточнения. Следует отметить, что традиционные поисковые платформы оказываются более эффективными для анализа самых новых и последних результатов, из-за неизбежных задержек, требуемых для обновления больших языковых моделей.

Таблица 2. Наиболее значимые технологических достижения применительно к физическим платформам для квантовых вычислений в период с 2020 года

Год	Физическая платформа	Статья для иллюстрации	Технологическое значение результата	
2023	Сверхпроводники: демонстрация квантовой коррекции ошибок	Kim et al., Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance [32]	Демонстрация повторяемых циклов квантовой коррекции ошибок необходима, как предварительный этап перед полной коррекцией ошибок	Nature
2023	Сверхпроводники: защищенные от шумов квантовые вентили	Puri et al., “Bias-preserving gates with stabilized cat qubits” [33]	Стабилизация вентилей путем аппаратного управления уровнем шума – важно для эффективной квантовой коррекции ошибок	Science Advances

2023	Ультрахолодные ионы: ионный транспорт	Pino et al., "Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer architecture" [34]	Ионный транспорт как технология для модульного масштабирования ионной платформы	Nature
2023	Нейтральные атомы: измерения в процессе выполнения алгоритмов	Graham et al., "Midcircuit Measurements on a Single-Species Neutral Alkali Atom Quantum Processor" [35]	Прогресс в реализации элементов квантовой коррекции ошибок с нейтральными атомами	Phys. Rev. X
2023	Нейтральные атомы: точные двухкубитовые вентили в больших массивах	Evered et al., "High-fidelity parallel entangling gates on a neutral-atom quantum computer" [36]	Улучшение точности вентилей в больших массивах, необходимое для реализации квантовой коррекции ошибок	Nature
2023	Спиновые кубиты в кремнии: многокубитовые вентили, интеграция	Weinstein et al., "Universal logic with encoded spin qubits in silicon" [37]	Демонстрация программируемых многокубитовых вентилей в спиновых кубитах на кремнии	Nature
2025	Фотоника: однофотонное детектирование на чипах	Raj et al., "Waveguide integrated superconducting nanowire single-photon detectors for integrated photonics" [38]	Интеграция сверхпроводящих нанопроволочных детекторов одиночных фотонов на чипе	Journal of Physics D: Applied Physics

Приведенные в Таблице 2 технологические публикации представляют интерес для оценки перспектив развития квантовых вычислений на следующем этапе. Видно, что в Таблице 2 присутствует широкий перечень технических платформ, которые станут в ближайшем будущем основой для реализации квантовых алгоритмов с большим числом кубитов.

5. Квантовая коррекция ошибок. С увеличением количества физических кубитов развитие технологий квантовых вычислений перешло на следующий этап – квантовой коррекции ошибок [39]. Важность этого направления на современном этапе хорошо видна из Таблиц 1 и 2. В связи с этим целесообразно отдельно рассмотреть основные принципы квантовой коррекции ошибок.

Исходная идея квантовой коррекции ошибок довольно проста – квантовая информация кодируется в состояниях нескольких физических кубитов, образующих так называемый логический кубит, например, $a|\bar{0}\rangle + b|\bar{1}\rangle = a|00 \dots 0\rangle + b|11 \dots 1\rangle$. Для кода коррекции ошибок введено обозначение $[[n, k, d]]$, где n – число физических кубитов, кодирующих k логических кубитов, а d – расстояние кода, или минимальное количество ошибок, произошедших с физическими кубитами, которые приводят к превращению одного логического состояния в другое, что эквивалентно расстоянию Хэмминга для двух битовых строк. Обозначения параметров квантового кода коррекции ошибок эквивалентны классическим для линейного кода, где n – размер кодового слова, k – число бит информационного слова, d – расстояние кода. Основная трудность в применении классических методов коррекции ошибок к квантовым системам заключается в следующем. Во-первых, состояние квантового бита

невозможно скопировать. Во-вторых, помимо классических ошибок вида «переворот бита», то есть $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ и $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$ существуют так называемые фазовые ошибки, например, $|1\rangle \rightarrow -|1\rangle$.

Самый простой код коррекции ошибок – это трехкубитовый код повторения $[[3, 1, 3]]$, где $|\bar{0}\rangle = |000\rangle$ и $|\bar{1}\rangle = |111\rangle$, позволяющий исправлять ошибки вида «переворот бита», то есть $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ и $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$. Классическая коррекция ошибок происходит в три этапа: детектирование ошибки, обработка ошибки, исправление ошибки. Квантовая коррекция ошибок выполняется по аналогии. Простейшая схема исправления квантовых ошибок вида «переворот бита» приведена на рис. 3(а). Шаг 1 изображает приготовление начального логического состояния $a|\bar{0}\rangle + b|\bar{1}\rangle$. Для этого используются два вентиля CNOT. Ошибка в одном бите возникает на шаге 2. Для её исправления потребуются вспомогательные кубиты, инициализированные в состояние $|0\rangle$ (шаг 3). Чтобы обнаружить, в каком именно кубите возникла ошибка, применяются коды стабилизаторов (шаги 4 и 5). Результат измерения состояний вспомогательных кубитов позволит определить синдром ошибки – состояние какого из физических кубитов будет отличаться от состояния двух остальных. После этого состояние этого кубита можно будет изменить, выполнив корректирующую процедуру на шаге 6, например, операцию «HE».

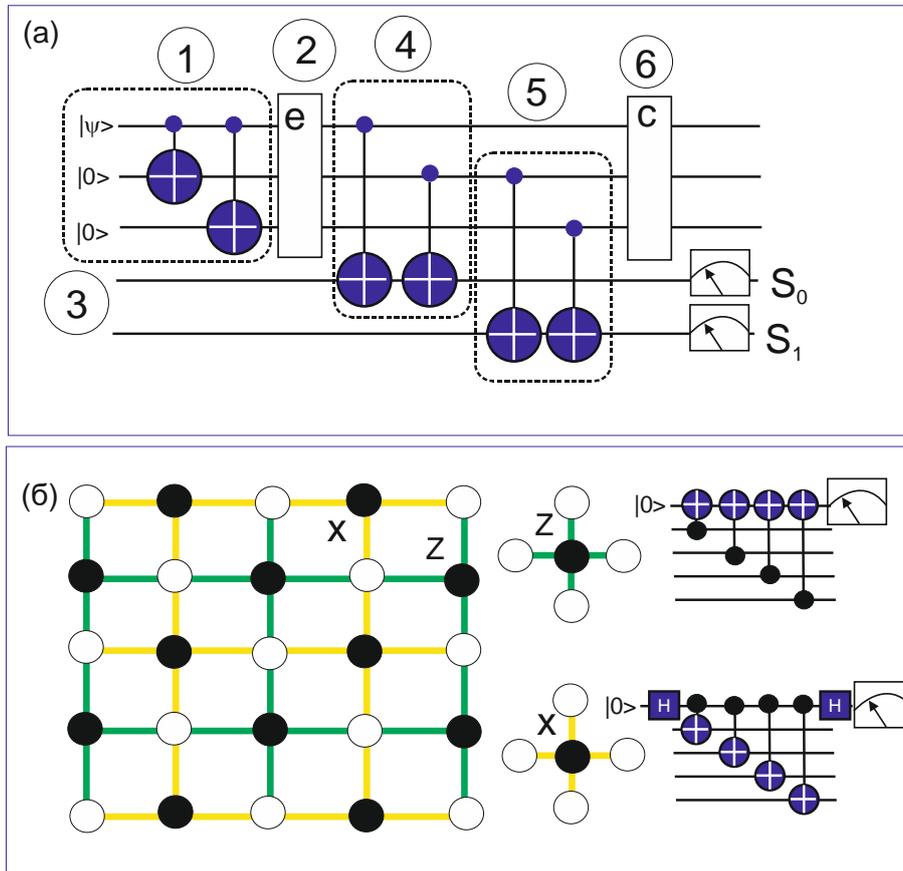


Рис. 3. (а) Простейший код квантовой коррекции ошибок (1) – приготовление начального состояния, (2) – возникновение ошибки, (3) – инициализация вспомогательных кубитов, (4,5) – коды стабилизаторов для генерации синдрома ошибки, (6) – исправление ошибки; (б) Поверхностный код коррекции ошибок. Пустые кружки – кубиты данных, закрашенные кружки – вспомогательные кубиты. Для генерации синдрома ошибки состояние кубита данных запутывается с состояниями четырех ближайших вспомогательных кубитов.

Квантовые схемы иллюстрируют коды стабилизаторов

Возможности такого кода повторения ограничены. Поэтому в современных экспериментах применяются поверхностные коды коррекции ошибок, которые хорошо соответствуют топологии современных квантовых процессоров [40]. Схема поверхностного кода приведена на рис. 3(б). Пустые кружки – кубиты данных, закрашенные кружки – вспомогательные кубиты. Код стабилизаторов генерируется путем квантового запутывания состояния вспомогательного кубита с четырьмя соседними кубитами данных. Для определения синдрома ошибки вида «переворот бита» используется код стабилизатора, обозначенный зеленым цветом, а для ошибки вида «переворот фазы» – код стабилизатора, обозначенный желтым цветом. Схематически оба кода изображены на рис. 3(б) в виде квантовых схем. Если ошибки в кубите данных не происходит, то результат измерения синдрома не изменяется между последовательными измерениями. В недавней работе [41] для 72-кубитного сверхпроводящего процессора было продемонстрировано, что коррекция ошибок с помощью поверхностных кодов позволяет преодолеть порог ошибок. Таким образом, разрушение квантовых состояний оказывается медленнее, чем исправление ошибок, что открывает возможности для увеличения глубины квантовых алгоритмов и в целом снимает ограничения третьего критерия диВинченцо.

7. Генерация квантовых кодов с использованием ChatGPT. ChatGPT является мощным инструментом программирования, который может применяться и для квантовых алгоритмов [43]. Для тестирования его возможностей применительно к квантовым вычислениям чат-боту было предложено написать пример простейшей программы для реализации поверхностного кода квантовой коррекции ошибок с использованием разработанной компанией IBM библиотеки Qiskit [44], и визуализировать квантовую схему и результаты коррекции кода.

Для упрощения интерпретации результатов было предложено построить код коррекции ошибок с расстоянием 3 и ограничиться коррекцией ошибок вида «переворот бита». Схема расположения кубитов, построенная сгенерированным кодом, приведена на рис. 4(а). Здесь индексом d (data) обозначены кубиты данных, а индексом a (ancilla) – вспомогательные кубиты.

Линии, соединяющие кубиты, указывают на выполнение двухкубитовых вентилях CNOT, в которых кубит данных является контролирующим, а вспомогательный кубит – контролируемым, что соответствует коду Z стабилизатора на рис. 4(б). В сгенерированной квантовой схеме была внесена ошибка вида «переворот бита» применительно к кубиту $d4$.

Синдром ошибки был получен путем измерения состояний вспомогательных кубитов. Переворот бита $d4$ приводит к инверсии состояний всех вспомогательных кубитов, в результате чего результат измерения синдрома является строкой «1111». Результат моделирования измерения синдрома с использованием симулятора Aer приведен на рис. 4(б) и соответствует ожидаемому. Результат измерения состояний кубитов данных $d0-d9$ приведен на рис. 4(в). Переворот кубита $d4$ виден как измерение строки «000010000», где состояние кубита $d4$ оказалось логической единицей. После измерения синдрома ошибок состояние кубитов данных может быть скорректировано путем инверсии состояния соответствующего бита в зависимости от значения измеренного синдрома. Результат коррекции приведен на рис. 4(г) – все кубиты вернулись в исходное состояние логического нуля. Следует отметить, что квантовая схема восстанавливает исходное состояние регистра независимо от того, для какого кубита данных была внесена ошибка. Таким образом, средствами ChatGPT был успешно сгенерирован демонстрационный код, иллюстрирующий основные принципы квантовой коррекции ошибок.

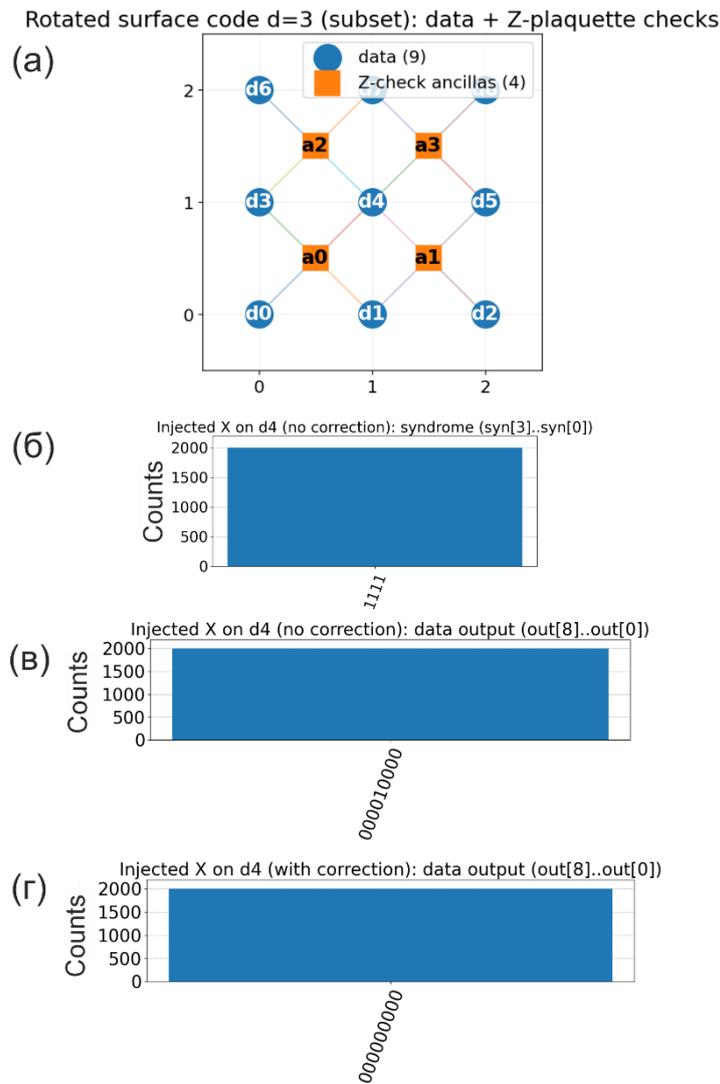


Рис. 4. (а) схема поверхностного кода для коррекции ошибок вида «переворот бита». (б) Измеренный синдром ошибок в случае, когда ошибка внесена для бита d4. (в) Результат измерения кубитов данных без коррекции ошибок. (г) Результат измерения кубитов данных с коррекцией ошибок по измеренному синдрому

8. Облачные системы для квантовых вычислений. Хотя облачный доступ к квантовым процессорам выглядел очевидным решением, компания IBM первой предоставила доступ к своим квантовым компьютерам неограниченному кругу пользователей. Тем самым она в некотором смысле повторила свой успех 1980-х годов, когда за счет открытой архитектуры был создан стандарт персонального компьютера IBM PC. Экосистема IBM объединяет реальные квантовые процессоры, доступ к которым предоставляется в порядке очереди, симуляторы квантовых процессоров с близкими техническими характеристиками, визуальный редактор квантовых схем и Qiskit - библиотеку для программирования квантовых процессоров для языка Python [43]. Особенность этой библиотеки заключается в том, что мгновенный доступ к квантовому симулятору для моделирования квантовых схем и к реальному квантовому процессору реализованы максимально похожим образом. Это дает пользователю возможность отработать свою квантовую схему на квантовом симуляторе, а уже потом поставить ее в очередь для запуска на квантовом процессоре. В результате, в 2024 году в мире более 600 тысяч пользователей запускали программы на квантовых процессорах IBM. В настоящее время компания IBM блокирует доступ к своим квантовым процессорам для пользователей из России и Китая, но библиотека Qiskit остается общедоступной. Компания

Google разработала для пользователей симулятор Cirq для языка Python, который удобно запускать в онлайн режиме в среде Google Colab [44], но без доступа к реальным квантовым процессорам его популярность оказалась существенно ниже. Компания Microsoft разработала язык квантового программирования Q Sharp [45], который тоже не отличается большой популярностью и используется, по-видимому, главным образом специалистами самой компании для программирования различных квантовых процессоров, включая сверхпроводящую и ионную платформы. В настоящее время можно получить облачный доступ к квантовым процессорам Quafu Пекинской академии квантовых вычислений, где используются совместимые с Qiskit библиотеки [46]. В России существует облачная платформа Vauman Ostillion для гибридного квантово-классического вычислительного комплекса на базе сверхпроводящего сопроцессора [47].

Заключение. В статье дан краткий обзор современного состояния дел в области квантовых вычислений. Этот обзор включает оценку наиболее важных результатов последних лет и перспективных приложений квантовых компьютеров, полученную в том числе с помощью больших языковых моделей, основные принципы квантовых вычислений, сравнение платформ для их физической реализации, основные идеи квантовой коррекции ошибок, благодаря которым в ближайшие годы должно быть достигнуто значительное увеличение глубины квантовых алгоритмов. Именно экспериментальная реализация квантовой коррекции ошибок в настоящее время является магистральным направлением развития квантовых процессоров. В то же время, принципиальное значение имеет поиск первых практических приложений квантовых компьютеров, которые стали потенциально возможны после демонстрации квантового превосходства.

В качестве примера с помощью больших языковых моделей сгенерирован простейший алгоритм реализации поверхностного кода квантовой коррекции ошибок для среды квантового программирования IBM Qiskit. Верификация алгоритма проведена с помощью общедоступного квантового симулятора IBM Aer.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта РФФИ 23-42-00031.

Список источников

1. Борн М. О квантовой механике / М. Борн, П. Иордан // Успехи физических наук, 1977. – Т. 122, вып. 4. – С. 586-611.
2. Quantum 2025, available at: <https://quantum2025.org/> (accessed: 10/29/2025).
3. Nobel Prize, available at: www.nobelprize.org (accessed: 10/29/2025)
4. Nobel Prize, Interview with Michel Devoret, available at: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/devoret/interview/> (accessed: 10/29/2025)
5. Nobel Prize, Interview with John Martinis, available at: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/martinis/interview/> (accessed: 10/29/2025)
6. Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 2019, vol. 574, pp. 505–510, DOI: 10.1038/s41586-019-1666-5.
7. Shor P.W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS)*. IEEE, 1994, pp. 124-134.
8. King A.D., Nocera A., Rams M.M., et al. Beyond-classical computation in quantum simulation. *Science*, 2025, vol. 388, pp. 199-204, DOI: 10.1126/science.ado6285
9. Preskill J. Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2018, vol. 2, p. 79, DOI: 10.22331/q-2018-08-06-79.
10. Huang H.Y., Choi S., McClean J.R., et al. The vast world of quantum advantage. *arXiv*, DOI:10.48550/arXiv.2508.05720
11. AbuGhanem M. IBM Quantum computers: evolution, performance, and future directions. *The Journal of supercomputing*, 2025, vol. 81, p. 687, DOI: 10.1007/s11227-025-07047-7
12. Bravyi S., Dial O., Gambetta J.M., Gil D., Nazario Z. The future of quantum computing with superconducting qubits. *Journal of Applied Physics*, 2022, vol. 132, p. 160902, DOI: 10.1063/5.0082975.

13. BlueQubit. Google's Quantum Computing Chip Willow, available at: <https://www.bluequbit.io/googles-quantum-computing-chip-willow> (accessed: 10/29/2025)
14. McArdle S., Endo S., Aspuru-Guzik A., Benjamin S.C., Yuan X. Quantum computational chemistry. *Reviews of modern physics*, 2020, vol. 92, p. 015003, DOI: 10.1103/RevModPhys.92.015003
15. Kjaergaard M., Schwartz M.E., Braumüller J., et al. Superconducting qubits: current state of play. *Annual review of condensed matter physics*, 2020, vol. 11, p. 369, DOI: 10.1146/annurev-conmatphys-031119-050605
16. Zhong H.-S., Wang H., Deng Y.-H. et al. Quantum computational advantage using photons. *Science*, 2020, vol. 370, pp. 1460, DOI: 10.1126/science.abe8770.
17. Cerezo M., Arrasmith A., Babbush R. et al. Variational quantum algorithms. *Nature reviews physics*, 2021, vol. 3, p. 625, DOI: 10.1038/s42254-021-00348-9
18. Wu Y., Bao W.-S., Cao S. et al. Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor. *Physical review letters*, 2021, vol. 127, p. 180501, DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.180501.
19. Endo S., Cai Z., Benjamin S.C., Yuan X. Hybrid quantum-classical algorithms and quantum error mitigation. *Journal of the physical society of Japan*, 2021, vol. 90, p. 032001, DOI: 10.7566/JPSJ.90.032001.
20. Bharti K., Cervera-Lierta A., Kyaw T.H. et al. Noisy intermediate-scale quantum (NISQ) algorithms. *Reviews of modern physics*, 2022, vol. 94, p. 015004, DOI: 10.1103/RevModPhys.94.015004.
21. Tilly J., Chen H., Cao S. et al. The Variational quantum eigensolver: a review of methods and best practices. *Physics reports*, 2022, vol. 986, p. 1, DOI: 10.1016/j.physrep.2022.08.003
22. Madsen L.S., Laudenbach F., Askarani M.F. et al. Quantum computational advantage with a programmable photonic processor. *Nature*, 2022, vol. 606, p. 75, DOI: 10.1038/s41586-022-04725-x.
23. Kim Y., Eddins A., Anand S. et al. Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance. *Nature*, 2023, vol. 618, p. 500, DOI: 10.1038/s41586-023-06096-3.
24. Нильсен М. Квантовые вычисления и квантовая информация / М. Нильсен, И. Чанг. – М.: Мир, 2006. – 822 с.
25. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Physical Review*, 1935, vol. 47, pp. 777–780, DOI: 10.1103/PhysRev.47.777.
26. DiVincenzo D.P. Quantum Computation. *Science*, 1995, vol. 270, no. 5234, p. 255, DOI: 10.1126/science.270.5234.255.
27. Nakamura Y., Pashkin Yu.A., Tsai J.-S. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box. *Nature*, 1999, vol. 398, pp. 786-788, DOI: 10.1038/19718.
28. Cirac J.I., Zoller P. Quantum computations with cold trapped ions. *Physical review letters*, 1995, vol. 74, no. 20, pp. 4091-4094, DOI: 10.1103/PhysRevLett.74.4091.
29. Briegel H.-J., Calarco T., Jaksch D., et al. Quantum computing with neutral atoms. *Journal of Modern Optics*, 2000, vol. 47, no. 14-15, pp. 415-451.
30. Manetsch H.J., Nomura G., Bataille E. et al. A tweezer array with 6,100 highly coherent atomic qubits. *Nature*, 2025, vol. 647, p. 60, DOI: 10.1038/s41586-025-09641-4.
31. List of quantum processors, available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_quantum_processors (accessed: 10/29/2025)
32. Kim Y., Eddins A., Anand S. et al. Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance. *Nature*, 2023, vol. 618, p. 500, DOI: 10.1038/s41586-023-06096-3.
33. Puri S., St-Jean L., Gross J.A. et al. Bias-preserving gates with stabilized cat qubits. *Science Advances*, 2020, vol. 6, no. 34, DOI: 10.1126/sciadv.aay5901.
34. Pino J.M., Dreiling J.M., Figgatt C. et al. Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer architecture. *Nature*, 2021, vol. 592, p. 209, DOI: 10.1038/s41586-021-03318-4.
35. Graham T.M., Phuttitarn L., Chinnarasu R. et al. Midcircuit measurements on a single-species neutral alkali atom quantum processor. *Physical Review X*, 2023, vol. 13, p. 041051, DOI: 10.1103/PhysRevX.13.041051.
36. Evered S.J., Bluvstein D., Kalinowski M. et al. High-fidelity parallel entangling gates on a neutral-atom quantum computer. *Nature*, 2023, vol. 622, p. 268, DOI: 10.1038/s41586-023-06481-y.
37. Weinstein A.J., Reed M.D., Jones A.M. et al. Universal logic with encoded spin qubits in silicon. *Nature*, 2023, vol. 615, p. 817, DOI: 10.1038/s41586-023-05777-3.
38. Raj V., Azem A., Patterson M. Waveguide integrated superconducting nanowire single-photon detectors for integrated photonics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2025, vol. 58, p. 243001, DOI: 10.1088/1361-6463/add946.
39. Devitt S.J., Munro W.J., Nemoto K. Quantum error correction for beginners. *Reports on Progress in Physics*, 2013, vol. 76, no. 7, p. 076001. DOI: 10.1088/0034-4885/76/7/076001.
40. Fowler A.G., Mariantoni M., Martinis J.M., Cleland A.N. Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation. *Physical Review A*, 2012, vol. 86, p. 032324. DOI: 10.1103/PhysRevA.86.032324.

41. Acharya R. et al. Quantum error correction below the surface code threshold. *Nature*, 2025, vol. 638, pp. 920–926, DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y.
42. Dupuis N. et al. Qiskit Code Assistant: Training LLMs for generating Quantum Computing Code. arXiv, 2024, available at: <https://arxiv.org/abs/2405.19495v1> (accessed: 10/29/2025).
43. Qiskit. GitHub repository, available at: <https://github.com/Qiskit/qiskit> (accessed: 10/29/2025).
44. Cirq. Available at: <https://quantumai.google/cirq> (accessed: 10/29/2025).
45. Microsoft. Introduction to Q#, available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/azure/quantum/qsharp-overview> (accessed: 10/29/2025).
46. Quafu Quantum Computing Platform. Available at: <https://quafu-sqc.baqis.ac.cn/framework/home> (accessed: 10.29.2025).
47. Octillion Project. Available at: <https://octillion.bmstu.ru/> (accessed: 10/29/2025).

Бетеров Илья Игоревич. К.ф.-м.н., с.н.с. Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, доцент Новосибирского государственного университета, автор теоретических и экспериментальных исследований по применению ультрахолодных нейтральных атомов для квантовых вычислений. AuthorID: 120600, SPIN: 3644-0610, ORCID: 0000-0002-6596-6741. beterov@isp.nsc.ru, 630090, Россия, Новосибирск.

Чэнь Цзюньси. Аспирант НГУ, инженер Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, AuthorID: 1330964; SPIN: 5023-4741, ORCID: 0009-0001-2107-2543. 875709591@qq.com. 630090, Россия, Новосибирск.

Ложкина Екатерина Андреевна. Студентка Новосибирского государственного университета, ORCID: 0009-0006-6209-8025, lozhechka2008@yandex.ru, 630090, Россия, Новосибирск.

UDC 530.145.83

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.001

Quantum computing on perspective platforms

Ilya I. Beterov^{1,2}, Chen Junxi^{1,2}, Ekaterina A. Lozhkina²

¹Rzhanov institute of semiconductor physics SB RAS, Russia, Novosibirsk

²Novosibirsk state university, Russia, Novosibirsk, beterov@isp.nsc.ru

Abstract. This work presents a brief overview of the current state of quantum computing. In recent years, this field of research has seen rapid progress, primarily in the development of experimental methods for controlling the states of multiparticle quantum systems. At the same time, the question of the practical applications of quantum computing remains open. The most promising areas, where such applications may emerge in the coming years, include solving problems in quantum chemistry, materials science, and various optimization problems. Current experimental work on the implementation of various quantum algorithms using intermediate-scale quantum processors with tens and hundreds of qubits—two-level quantum systems that are the fundamental logical elements of a quantum computer—has generated considerable interest in the scientific community. This is clearly demonstrated by the results of a bibliometric analysis conducted using Google Scholar and ChatGPT.

The experimental implementation of quantum computing is currently characterized by competition among several physical platforms, with the superconducting platform leading the way, a feat recognized by the 2025 Nobel Prize in Physics. At the same time, alternative platforms—photons, ions, and neutral atoms—offer a number of potential advantages. The most significant development in experimental quantum computing in future years is quantum error correction, which should increase the depth of quantum algorithms and enable the implementation of the most complex universal quantum algorithms. The basic principles of quantum error correction and the implementation of a surface code that best suits the architecture of modern quantum processors are presented in the article.

Based on existing superconducting quantum processors, cloud access has been implemented, allowing researchers to conduct both numerical simulations and experiments on the implementation of quantum computing. The IBM Qiskit library, which has become the de facto standard, is widely used for this purpose. As an example, the paper presents a demonstration of elements of a surface code for quantum error correction, implemented using large language models.

Keywords: quantum computing, quantum computers, quantum error correction

Acknowledgements: This work is supported by Russian Science Foundation Grant No. 23-42-00031

References

1. Born M., Jordan P. On kvantovoy mekhanike [On quantum mechanics]. Uspekhi fizicheskikh nauk [Advances in physical sciences], 1977, vol. 122, no. 4, pp. 586-611.
2. Quantum 2025, available at: <https://quantum2025.org/> (accessed: 10/29/2025).
3. Nobel Prize, available at: www.nobelprize.org (accessed: 10/29/2025)
4. Nobel Prize, Interview with Michel Devoret, available at: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/devoret/interview/> (accessed: 10/29/2025)
5. Nobel Prize, Interview with John Martinis, available at: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/martinis/interview/> (accessed: 10/29/2025)
6. Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. Nature, 2019, vol. 574, pp. 505–510, DOI: 10.1038/s41586-019-1666-5.
7. Shor P.W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS). IEEE, 1994, pp. 124-134.
8. King A.D., Nocera A., Rams M.M., et al. Beyond-classical computation in quantum simulation. Science, 2025, vol. 388, pp. 199-204, DOI: 10.1126/science.ado6285
9. Preskill J. Quantum computing in the NISQ era and beyond. Quantum, 2018, vol. 2, p. 79, DOI: 10.22331/q-2018-08-06-79.
10. Huang H.Y., Choi S., McClean J.R., et al. The vast world of quantum advantage. arXiv, DOI: 10.48550/arXiv.2508.05720
11. AbuGhanem M. IBM Quantum computers: evolution, performance, and future directions. The Journal of supercomputing, 2025, vol. 81, p. 687, DOI: 10.1007/s11227-025-07047-7
12. Bravyi S., Dial O., Gambetta J.M., Gil D., Nazario Z. The future of quantum computing with superconducting qubits. Journal of Applied Physics, 2022, vol. 132, p. 160902, DOI: 10.1063/5.0082975.
13. BlueQubit. Google's Quantum Computing Chip Willow, available at: <https://www.bluequbit.io/googles-quantum-computing-chip-willow> (accessed: 10/29/2025)
14. McArdle S., Endo S., Aspuru-Guzik A., Benjamin S.C., Yuan X. Quantum computational chemistry. Reviews of modern physics, 2020, vol. 92, p. 015003, DOI: 10.1103/RevModPhys.92.015003
15. Kjaergaard M., Schwartz M.E., Braumüller J., et al. Superconducting qubits: current state of play. Annual review of condensed matter physics, 2020, vol. 11, p. 369, DOI: 10.1146/annurev-conmatphys-031119-050605
16. Zhong H.-S., Wang H., Deng Y.-H. et al. Quantum computational advantage using photons. Science, 2020, vol. 370, pp. 1460, DOI: 10.1126/science.abe8770.
17. Cerezo M., Arrasmith A., Babbush R. et al. Variational quantum algorithms. Nature reviews physics, 2021, vol. 3, p. 625, DOI: 10.1038/s42254-021-00348-9
18. Wu Y., Bao W.-S., Cao S. et al. Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor. Physical review letters, 2021, vol. 127, p. 180501, DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.180501.
19. Endo S., Cai Z., Benjamin S.C., Yuan X. Hybrid quantum-classical algorithms and quantum error mitigation. Journal of the physical society of Japan, 2021, vol. 90, p. 032001, DOI: 10.7566/JPSJ.90.032001.
20. Bharti K., Cervera-Lierta A., Kyaw T.H. et al. Noisy intermediate-scale quantum (NISQ) algorithms. Reviews of modern physics, 2022, vol. 94, p. 015004, DOI: 10.1103/RevModPhys.94.015004.
21. Tilly J., Chen H., Cao S. et al. The Variational quantum eigensolver: a review of methods and best practices. Physics reports, 2022, vol. 986, p. 1, DOI: 10.1016/j.physrep.2022.08.003
22. Madsen L.S., Laudenbach F., Askarani M.F. et al. Quantum computational advantage with a programmable photonic processor. Nature, 2022, vol. 606, p. 75, DOI: 10.1038/s41586-022-04725-x.
23. Kim Y., Eddins A., Anand S. et al. Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance. Nature, 2023, vol. 618, p. 500, DOI: 10.1038/s41586-023-06096-3.
24. Nielsen M., Chuang I. Kvantovyye vychisleniya i kvantovaya informatsiya [Quantum Computation and Quantum Information]. Moscow, Mir [World] Publ., 2006, 822 p.
25. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? Physical Review, 1935, vol. 47, pp. 777–780, DOI: 10.1103/PhysRev.47.777.
26. DiVincenzo D.P. Quantum Computation. Science, 1995, vol. 270, no. 5234, p. 255, DOI: 10.1126/science.270.5234.255.
27. Nakamura Y., Pashkin Yu.A., Tsai J.-S. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box. Nature, 1999, vol. 398, pp. 786-788, DOI: 10.1038/19718.
28. Cirac J.I., Zoller P. Quantum computations with cold trapped ions. Physical review letters, 1995, vol. 74, no. 20, pp. 4091-4094, DOI: 10.1103/PhysRevLett.74.4091.

29. Briegel H.-J., Calarco T., Jaksch D., et al. Quantum computing with neutral atoms. *Journal of Modern Optics*, 2000, vol. 47, no. 14-15, pp. 415-451.
30. Manetsch H.J., Nomura G., Bataille E. et al. A tweezer array with 6,100 highly coherent atomic qubits. *Nature*, 2025, vol. 647, p. 60, DOI: 10.1038/s41586-025-09641-4.
31. List of quantum processors, available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_quantum_processors (accessed: 10/29/2025)
32. Kim Y., Eddins A., Anand S. et al. Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance. *Nature*, 2023, vol. 618, p. 500, DOI: 10.1038/s41586-023-06096-3.
33. Puri S., St-Jean L., Gross J.A. et al. Bias-preserving gates with stabilized cat qubits. *Science Advances*, 2020, vol. 6, no. 34, DOI: 10.1126/sciadv.aay5901.
34. Pino J.M., Dreiling J.M., Figgatt C. et al. Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer architecture. *Nature*, 2021, vol. 592, p. 209, DOI: 10.1038/s41586-021-03318-4.
35. Graham T.M., Phuttitarn L., Chinnarasu R. et al. Midcircuit measurements on a single-species neutral alkali atom quantum processor. *Physical Review X*, 2023, vol. 13, p. 041051, DOI: 10.1103/PhysRevX.13.041051.
36. Evered S.J., Bluvstein D., Kalinowski M. et al. High-fidelity parallel entangling gates on a neutral-atom quantum computer. *Nature*, 2023, vol. 622, p. 268, DOI: 10.1038/s41586-023-06481-y.
37. Weinstein A.J., Reed M.D., Jones A.M. et al. Universal logic with encoded spin qubits in silicon. *Nature*, 2023, vol. 615, p. 817, DOI: 10.1038/s41586-023-05777-3.
38. Raj V., Azem A., Patterson M. Waveguide integrated superconducting nanowire single-photon detectors for integrated photonics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2025, vol. 58, p. 243001, DOI: 10.1088/1361-6463/add946.
39. Devitt S.J., Munro W.J., Nemoto K. Quantum error correction for beginners. *Reports on Progress in Physics*, 2013, vol. 76, no. 7, p. 076001. DOI: 10.1088/0034-4885/76/7/076001.
40. Fowler A.G., Mariantoni M., Martinis J.M., Cleland A.N. Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation. *Physical Review A*, 2012, vol. 86, p. 032324. DOI: 10.1103/PhysRevA.86.032324.
41. Acharya R. et al. Quantum error correction below the surface code threshold. *Nature*, 2025, vol. 638, pp. 920–926, DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y.
42. Dupuis N. et al. Qiskit Code Assistant: Training LLMs for generating Quantum Computing Code. *arXiv*, 2024, available at: <https://arxiv.org/abs/2405.19495v1> (accessed: 10/29/2025).
43. Qiskit. GitHub repository, available at: <https://github.com/Qiskit/qiskit> (accessed: 10/29/2025).
44. Cirq. Available at: <https://quantumai.google/cirq> (accessed: 10/29/2025).
45. Microsoft. Introduction to Q#, available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/azure/quantum/qsharp-overview> (accessed: 10/29/2025).
46. Quafu Quantum Computing Platform. Available at: <https://quafu-sqc.baqis.ac.cn/framework/home> (accessed: 10.29.2025).
47. Octillion Project. Available at: <https://octillion.bmstu.ru/> (accessed: 10/29/2025).

Beterov Ilya Igorevich. *Ph.D. senior science researcher at Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, lecturer at Novosibirsk State University, research interests are focused on application of ultracold neutral atoms for quantum computing. AuthorID: 120600, SPIN: 3644-0610, ORCID: 0000-0002-6596-6741. betarov@isp.nsc.ru. 630090, Russia, Novosibirsk.*

Chen Junxi. *Ph.D. student at Novosibirsk State University, engineer at Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, AuthorID: 1330964; SPIN: 5023-4741, ORCID: 0009-0001-2107-2543. 875709591@qq.com. 630090, Russia, Novosibirsk.*

Lozhkina Ekaterina Andreevna. *Student at Novosibirsk State University lozhechka2008@yandex.ru, Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia.*

Статья поступила в редакцию 30.10.2025; одобрена после рецензирования 10.02.2026; принята к публикации 10.02.2026.

The article was submitted 10/30/2025; approved after reviewing 02/10/2026; accepted for publication 02/10/2026.

УДК 004.896 004.031

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.002

Обзор современного состояния понимания концепта «автономность технических средств»

Лукинова Ольга Васильевна

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Россия, Москва, lobars@mail.ru

Аннотация. В статье представлен обзор современного состояния некоторых вопросов, связанных с такой предметной областью, как автономность технических средств. На сегодняшний день этот концепт не имеет четкого методологического или формализованного определения, что, в условиях перехода на цифровые технологии, представляется существенной проблемой при проектировании или внедрении средств с элементами искусственного интеллекта с заданной степенью автономности будущего изделия. Описаны разные подходы к пониманию термина «автономия», подчеркивается, что автономность следует рассматривать, как дальнейшее развитие свойств автоматизации технического средства, наряду с его автоматизмом и адаптивностью. Раскрываются используемые некоторыми зарубежными специалистами понятия «сильная автономность» и «слабая автономность», которые соотносятся со свойствами автоматизации технической системы. Дается подробный обзор методов и моделей оценки автоматизации для различных предметных областей. При этом, описанные методы применяются к задачам оценки технических систем как со слабой автономностью, т.е. к автоматизированным системам, так и с сильной. Представлены зарубежные и отечественные источники, содержащие различные критерии оценки уровня автономности. Показано, что оценочные показатели являются исключительно экспертными, носят неформальный характер и касаются не сущностного качества свойства автономии технического средства, а результата его функционирования. В связи с этим фактом при решении вопроса об оценке уровня автономности средства следует использовать алгоритмы принятия решений в неструктурированных областях, основанные на свертке векторного критерия, имеющего иерархический характер. Таким образом, цель и новизна данной работы заключается в том, чтобы, проанализировав многочисленные источники, показать ограниченность научно-методического аппарата оценивания такого сложного понятия, как автономность технических средств, которое, на сегодняшний день, основывается исключительно на субъективных оценках наблюдателя, а также необходимость перехода к формальным или, хотя бы, формализованным способам.

Ключевые слова: автоматизация, автономность, техническая система, оценка уровня автономности

Цитирование: Лукинова О.В. Обзор современного состояния понимания концепта «автономность технических средств» / О.В. Лукинова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 23-42 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.002.

Введение. Современный этап развития цифровой экономики характеризуется повсеместным внедрением во все сферы жизни общества различных автономных технических устройств. Несмотря на то, что концепция разработки и эксплуатации автономных роботизированных систем берет начало еще в 1980-х годах, понятие автономности таких систем на сегодняшний день не имеет четкого методологического определения и понимания, этим объясняется, на взгляд автора, актуальность исследований в данной области.

Существуют следующие подходы к определению и пониманию термина «автономность» технической системы (ТС):

1. Автономность ТС в смысле долговременного функционирования вдали от мест пополнения ресурсов, необходимых для осуществления функционирования ТС (например, автономное плавание подводной лодки). Данный подход нас не интересует, т.к. целью является исследование программной составляющей ТС.
2. Второй подход означает развитие свойств автоматизации до крайней точки, когда полностью автоматизированная система переходит в категорию автоматической (именно такие системы некоторые авторы называют автономными). При этом, алгоритмы, на

базе которых реализованы те или иные функции технического объекта, носят, согласно [1], строго детерминированный характер и имеют четкий, прозрачный алгоритм.

3. Третье направление связано непосредственно со смыслом термина «автономность». Наиболее полное толкование приведено в [2]: «Автономность – это характеристика высокоорганизованных (технических, биологических, социальных и других) систем, согласно которой функционирование и поведение таких систем определяется их внутренними основаниями и не зависит от воздействия внешней среды и других систем. Автономность систем подразумевает наличие у них имманентных собственных закономерностей существования и развития, их действие по внутренним основаниям и побуждениям, по законам функционирования своей внутренней организации, а также обусловленное этим состояние саморегулируемости». К автономным системам в указанном смысле, безусловно, относятся все живые организмы, включая человека. В будущем к такого рода системам, станут относиться те технические объекты, которые приобретут свойства субъектности за счет действительной и полной интеллектуализации программного обеспечения (ПО), встроенного в систему управления ТС. Безусловно, на сегодняшний день этот фактор является целевым в области развития автономности технических систем.
4. Еще одной тенденцией являются следующие рассуждения. Автономность ТС – это следующий (после автоматического) уровень развития автоматизации систем, т.е. автономные ТС являются не отдельной ветвью дихотомии «автоматизированные ТС (включая автоматические) – автономные ТС», а следствием развития в области автоматизации трех факторов:
 - с одной стороны – увеличением количества ручных функций, выполняемых человеком с помощью данного технического объекта за счет их автоматизации путем внедрения в объект ПО. Если автоматизированы все функции – такой объект приобретает свойства автоматического выполнения поставленной задачи и становится программным автоматом.
 - свойства адаптивности, когда автоматизированная система может реагировать на изменения внешней среды, однако эта реакция есть работа, по-прежнему, детерминированных алгоритмов на основе формализованных моделей.
 - с другой – развитием качества алгоритмов от полностью определенных к алгоритмам недетерминированным, не имеющим четкого, формального алгоритма решения задачи, т.е. обладающих чертами интеллекта [1].

Последний, четвертый, подход дает возможность подойти к пониманию автономности с точки зрения развития автоматизации от процессов механизации до когнитивных форм деятельности человека. Поэтому далее в работе аспекты автоматизации и автономности описаны в контексте последнего подхода.

Еще одной особенностью описываемой предметной области является тот факт, что не удалось найти опубликованных исследований, содержащих общие теоретические и методологические характеристики и представления об автономных ТС. Литературные источники отражают, в основном, понимание автономности в отдельных предметных областях: автономность в автомобильном транспорте, автономные морские суда, беспилотные летательные аппараты и т.д.

В статье описаны текущие представления специалистов о проблеме идентификации автономных ТС, понимания сути оценочных критериев степени автономности, а также выполнен обзор методов и моделей оценки уровня автономности роботизированных устройств из различных предметных областей. Цель данной работы заключается в том,

чтобы, проанализировав многочисленные источники, показать ограниченность научно-методического аппарата оценивания такого сложного понятия, как автономность ТС, которое, на сегодняшний день, основывается исключительно на субъективных оценках наблюдателя, а также необходимости перехода к формальным или, хотя бы, формализованным способам, что, безусловно, способствовало бы решению проблемы проектирования технических устройств с элементами искусственного интеллекта с заданной степенью автономности будущего изделия.

1. Способы функционирования автоматизированных систем. В соответствии с последним подходом, автоматизированные ТС прошли определенный путь развития от автоматизации механизированных функций до автономных (в той или иной мере) способов функционирования. Далее описана характеристика этапов развития таких ТС.

Автоматизацию можно считать высшей степенью механизации, то есть способностью системы выполнять процессы или выполнять действия без участия оператора. Однако, автоматизированная система (АС) не делает выбор сама, она только следует сценарию, который уже закодирован. Если возникает незапланированная ситуация, она может только ждать помощи человека [3].

Очевидно, что следующий этап развития АС был связан с увеличением количества автоматизируемых функций технического объекта. Чем большее количество функций системы управления (СУ) объекта выполняется за счет программного компонента, тем выше уровень автоматизации. Крайний случай, когда автоматизированы все функции, – это автоматическая СУ, что означает способность системы самостоятельно контролировать свои внутренние функции и операции, способность запускаться и работать без какого-либо ручного вмешательства или внешней помощи. Более прагматичное определение термина «автоматический» дано в ИЕС 60050-351 [4]: «относящийся к процессу, устройству или оборудованию, которые при определенных условиях могут функционировать без вмешательства человека». Однако, как подчеркивается в [5], действия такой системы предопределены с самого начала, и автомат не имеет возможности изменить их в будущем. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ИСО 8373:2012 [6] автоматический режим работы определяет, как «состояние системы управления, при котором система управления робота работает в соответствии с программой выполнения задания».

Развитие формальных методов теории чувствительности, инвариантности, робастности позволяют наделить автоматическую систему адаптационными механизмами, под которыми понимается, согласно [7], процесс изменения параметров, структуры систем или управляющих воздействий на основе информации, получаемой во время управления, с целью достижения определенного (оптимального) качества управления при начальной неопределенности и/или изменяющихся условиях работы. Адаптивная система имеет возможность изменять свою работу (т.е. конфигурацию, состояние или функции). Это позволяет системе при ее функционировании справляться с временными и пространственными изменениями, как в долгосрочной (настройка/оптимизация среды), так и в краткосрочной перспективе (исключительные условия, такие, как вредоносные атаки, сбои и т. д.). Таким образом, свойство адаптивности может быть запрограммировано в системе, например, статистическими методами или машинным обучением, что позволяет компьютерной программе давать ответы, которые кажутся проявлением интеллектуальных свойств алгоритма, но эти ответы все еще ограничены рамками программного алгоритма.

Следующим после автоматических и адаптивных свойств уровнем развития идеологии автоматизации является придание системам управления ТС свойств автономности в виде «осознанности», т.е. возможности отслеживать (воспринимать) свой рабочий контекст, внешнюю

среду, а также внутреннее состояние, чтобы иметь возможность оценить, соответствует ли её текущая работа поставленным целям. Осознанность будет управлять адаптацией её рабочего поведения в ответ на изменения контекста или состояния. Как подчеркивается в [8, 9], автономия подразумевает мотивацию, способность или характеристику функционирования системы в неопределенных заранее условиях и устранять сбои без внешнего вмешательства.

С точки зрения философии, автономия является основной характеристикой, которую люди воплощают в своей практической деятельности и которая находится под влиянием окружающей среды и ограничивается ими самими. Чтобы понять автономию с точки зрения технологии, сначала следует четко определить соотношение концепции автоматизации и интеллекта. Так, в [10] интеллект – это способность определять, какое поведение максимизирует вероятность достижения цели в динамичных и неопределенных условиях. По мнению Клафа [11], интеллект представляется возможностью открывать знания и использовать их для решения проблем. Тогда, авторами [12], автономность правомерно представляется способностью системы достигать самоуправления путем принятия решений, их исполнения и оценки; система автономии может сама справляться с непредвиденными ситуациями, что сведет к минимуму вмешательство человека.

На сегодняшний день нет формальных или формализованных критериев, позволяющих определить четкую границу между свойствами автоматизации и автономности программной системы. Поэтому в некоторых источниках вводятся «слабое» и «сильное» понятия автономности. С точки зрения автора речь идет об определении:

1. Автоматизированных систем, включая свойства автомата и адаптивности («слабая» автономность). Так, в [13] предлагается определение автономности в слабом варианте: автономность означает работу технического средства без вмешательства человека в течение всего указанного периода времени при выполнении некоторой цели, заданной человеком. В отечественном стандарте [14] вводится термин «автономный режим» как «режим работы, при котором мобильный робот получает задание от оператора или внешней системы управления, с которой взаимодействует, и выполняет его без дальнейшего взаимодействия с оператором или внешней системой», что также можно интерпретировать как слабую автономность.
2. Систем, обладающих тем или иным уровнем автономности за счет интеллектуализации своих алгоритмов («сильная» автономность). Так, в [15] искусственный интеллект (artificial intelligence) определяется как: «Комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма и достижение инсайта) и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека. Тогда понятие «сильной» автономности основывается на некоторой осознанности автономной системой своих действий: это «степень, в которой робот может воспринимать окружающую среду, планировать действия на ее основе и воздействовать на нее с намерением достичь определенной цели (заданной роботу или созданной им) без внешнего контроля» [16]

2. Оценочные характеристики уровня автономности ТС. Уровень автономности зависит от имеющихся у системы возможностей, которые могут находиться в широком диапазоне – от интегрированной системы автоматических сенсоров до управляемого компьютером процесса принятия решений, т.е. от возможностей слабой до сильной автономности.

В 2001 году в компании IBM в рамках проекта «Автономные компьютерные системы» были сформулированы восемь определяющих характеристик автономной вычислительной системы (АВС) [17], которые, безусловно, могут быть адаптированы и к системам управления ТС:

1. АВС должна обладать свойством самоидентификации, т.е. должна хранить детальную информацию о своих компонентах, их текущем статусе, предельной мощности, возможностях и всех связях с другими системами, влияющих на неё, чтобы управлять собой. Она должна вести учет собственным ресурсам, тем ресурсам, которые она может заимствовать или одолжить и тем, которые могут быть разделены или должны быть изолированы.
2. АВС должна конфигурироваться и перенастраиваться в изменяющихся (а в будущем даже непредсказуемых) условиях. Конфигурация системы или «настройка» должна происходить автоматически, а также должна выполняться динамическая корректировка этой конфигурации, чтобы наилучшим образом справляться с изменяющимися условиями.
3. АВС функционирует в режиме постоянной оптимизации внутренней структуры и процедур с точки зрения достижения заранее predeterminedных общих целей системы.
4. АВС должна обладать способностями к обнаружению сбоев обычной деятельности и нахождению альтернативного способа использования ресурсов для самостоятельного переконфигурирования.
5. АВС должна быть способна обнаружить, идентифицировать и защититься от различного рода негативных внешних воздействий для сохранения системной безопасности, целостности и стабильности системы.
6. АВС должна получать информацию о внешней среде, особенно в контексте её собственной деятельности и действовать соответственно, включая генерацию правил для наилучшего взаимодействия с соседними системами. Она должна будет использовать имеющиеся ресурсы, даже договариваться об использовании другими системами своих недоиспользуемых элементов, изменяя при этом как себя, так и окружающую среду – одним словом, что и означает быть адаптивной.
7. АВС не может существовать в герметичной среде. Будучи независимой в своей способности управлять собой, она должна функционировать в неоднородном мире и внедрять открытые стандарты – другими словами, автономная вычислительная система не может, по определению, быть проприетарным решением.
8. АВС должна предвидеть и осуществлять оптимизацию своих ресурсов, с целью реализации поставленных целей в динамике, не вовлекая пользователя в эту реализацию.

В отечественном ГОСТ Р 60.6.0.1-2021 [6] под уровнем автономности понимается условная категория, позволяющая ранжировать сервисные мобильные объекты по степени их способности функционировать без вмешательства человека. Здесь же приводится перечень характеристик, которые позволяют детализировать данное определение. Это такие характеристики, как: восприятие внешней среды, автономный режим работы, адаптация к внешним условиям, мобильность, наблюдение, отказоустойчивость, очувствление, планирование достижения цели, предотвращение опасностей, самовосстановление, самодиагностика, ситуационная осведомленность, тактическое поведение, телеприсутствие, цель (миссия) и др. Контекстная семантика приведенных характеристик описана в [6].

Рабочей группой по уровням автономности для беспилотных систем (ALFUS) Национального института стандартов и технологий (NIST) был предложен следующий перечень характеристик для оценки уровня автономности беспилотных морских средств

(БМС) [18]: собственная способность БМС ощущать, воспринимать, анализировать, общаться, планировать, принимать решения и действовать для достижения своих целей, поставленных ее человеком-оператором(-ами) посредством спроектированного взаимодействия человека и робота (HRI).

Описанные характеристики можно соотнести с такими интегральными факторами, как *сложность миссии, сложность окружающей среды и уровень HRI* для выполнения миссий. Еще один интегральный критерий отмечен в [19]: автономность беспилотной системы должна описываться *производительностью* беспилотной системы при выполнении ею определенной миссии с высоким качеством, высокой эффективностью и способностью производить собственные намерения на основе боевой цели, с минимальным или отсутствием руководства со стороны операторов. Авторы [20] считают, что автономия должна содержать четыре уровня интерпретации:

1. Способность к самовосприятию, независимому суждению, самостоятельному принятию решений и осуществлению поведения.
2. Способность к самоуправлению.
3. Когнитивные способности, которые отражают степень взаимодействия человека и компьютера.
4. Способность беспилотной системы справляться с различными задачами в сложных, динамичных и неопределенных условиях.

Следует заметить, что в указанных источниках приведены достаточно обширные списки характеристик, более того, в некоторых методах оценки уровня автономности (будут описаны ниже) дается их детализировка в виде критериального дерева. Однако они все носят экспертный, субъективный характер.

3. Методы и модели оценки уровня автономных ТС. Основываясь на приведенных выше характеристиках, в этом разделе описаны методы и модели, позволяющие оценивать уровни автономности технических систем. При этом одни модели позволяют делать оценки в аспекте слабого определения автономности, т.е. на самом деле, оценивают уровень автоматизации. Другие – ориентируются на сильную автономность, т.е. на присутствие интеллектуальных алгоритмов. При этом реальная ситуация такова, что ТС в большинстве являются полуавтоматическими и полуавтономными, т.к. обладают как одними, так и другими качествами.

Кроме того, анализ показал, что на сегодняшний день существуют два варианта методов: а) оценка уровня автоматизации (методы LOA (Levels of automation)) исключительно на качественных основах; б) методы, позволяющие осуществлять сравнительный анализ автономности ТС: двух- и трехосные методы, метод паутины, метод на основе нечеткой логики и т.п.

Однако, в основе даже сравнительных методов, тем не менее, лежат экспертные оценки, а любой уровневый метод на основе использования технологии принятия рациональных решений в неструктурированных областях можно свести к получению интегральной балльной оценки, как результат свертки векторного критерия, имеющего иерархическую структуру [21, 22].

В настоящее время наиболее популярными оценочными методами являются: метод оценки уровня автоматизации LOA (Levels of automation) Шеридана [23-25]; метод ACL (автономный уровень управления) от Министерства обороны США [26-28]; методы ALFUS (NIST) [29-31]; метод SAE (Общество инженеров-автомобилестроителей) [32]; уровни автономности, определенные Регистром Ллойда [33]; уровни автоматизации, предоставленные IEC [34]; нечеткий метод оценки [35- 37] и др.

При этом семантика критериев оценки, их количество выбираются авторами, исходя из специфики предметной области. Так, Шеридан [23] формулирует 10 критериев для оценки автоматизированных производственных устройств с точки зрения участия человека в управлении устройством, в Программе NASA Vehicle Systems Program Highaltitude Long-range Sector (HALE Sector) сформулирована упрощенная оценка автономности (пять уровней) для авиационных систем [38]. Бир и др. выдвинули десять уровней автономности взаимодействия человека и робота (HRI) [16], Сообщество автомобильных инженеров SAE считает, что шести уровней вполне достаточно для описания всех автоматизированных функций вождения на дороге [39].

Ниже приведен обзор наиболее значимых методов в различных предметных областях.

Метод LOA Шеридана и Вепланка (Шив). Идея метода оценки уровня была впервые выдвинута Шериданом, который использовался для оценки уровня автоматических устройств. В своей работе 1978 г. Т. Шеридан и В. Вепланк (Массачусетский технологический институт) [23] предложили ставшее классическим 10-уровневое шкалирование по уровню компьютеризации и оценивания степени автоматизации в зависимости от того, кто принимает решение, вида операции и того, кто ее выполняет – человек или техническая система/компьютер (табл. 1) [23, 40-42]. Систематизация Шив включает вопросы обратной связи, определение и выбор вариантов, связанных с распределением задач между человеком и технической системой, компьютером. Эта шкала также является одной из наиболее подробных классификаций, которые можно найти в литературе с точки зрения определения того, что оператор (человек) и техническая система (компьютер для информации и контроля) должны выполнять на разных уровнях LOA, и как они должны взаимодействовать [42].

Таблица 1. 10 уровней автоматизации (LOA) по Т. Шеридану и В. Вепланку [42]

LOA	Описание
10	Компьютер решает все и действует автономно, игнорируя человека
9	Компьютер выполняет операции автоматически и информирует человека, только если он (компьютер) решит
8	Компьютер выполняет операции автоматически и информирует человека, только если компьютер "спросит"
7	Компьютер выполняет операции автоматически, обязательно информируя человека
6	Компьютер предлагает одну альтернативу и выполняет это предложение, если человек в течение ограниченного времени не накладывает вето на автоматическое выполнение операции
5	Компьютер предлагает одну альтернативу и автоматически выполняет это предложение, если человек соглашается
4	Компьютер предлагает одну альтернативу
3	Компьютер предлагает полный набор решений/действий, альтернативы и сужает выбор до нескольких вариантов
2	Компьютер предлагает человеку полный набор решений /действий, альтернативы
1	Компьютер не предлагает помощь: человек должен принимать решения и выполнять все действия сам

Метод LOA Сообщества автомобильных инженеров. В 2018-21 годах специалисты Сообщества автомобильных инженеров (Society of Automotive Engineers, SAE) представили обновлённые версии стандарта SAE J3016 «Системы автоматизированного управления движением АТС. Классификация, термины и определения», который впервые был опубликован в 2014 году [32, 39]. Рассматриваемый стандарт является наиболее цитируемым справочником в области автоматизации транспортных средств. В этом документе представлены 6 уровней системы автоматизации вождения транспортных средств,

описывающие полный спектр автоматизированных функций, которые выполняют часть или всю задачу динамического вождения (DDT) на постоянной основе в контексте эксплуатации транспортных средств на дорогах: 0) нет автоматизации вождения; 1) система помощи водителю; 2) частичная автоматизация вождения; 3) условная автоматизация вождения; 4) высокая степень автоматизации вождения; 5) полная автоматизация вождения.

При этом, системы активной безопасности, такие, как электронный контроль устойчивости (ESC) и автоматическое экстренное торможение (АЕВ), система помощи при удержании в полосе движения (LKA), а также те системы, которые только информируют, предупреждают или предупреждают водителя об опасностях в условиях вождения, исключены из области предложенной таксономии автоматизации вождения. Объясняется это тем, что они не выполняют часть или весь DDT на постоянной основе, а скорее обеспечивают мгновенное вмешательство во время потенциально опасных ситуаций.

Для разъяснения и упрощения уровней автоматизации вождения по стандарту J3016 маркетинговая группа SAE совместно с Комитетом по техническим стандартам представили сводную таблицу (рис. 1).

	SAE УРОВЕНЬ 0	SAE УРОВЕНЬ 1	SAE УРОВЕНЬ 2	SAE УРОВЕНЬ 3	SAE УРОВЕНЬ 4	SAE УРОВЕНЬ 5
Что должен делать человек на месте водителя?	Вы <u>управляете</u> автомобилем, когда используются эти системы, даже если ваши ноги не находятся на педалях, а руки – на руле			Вы <u>не управляете</u> автомобилем, когда задействованы эти системы, даже если вы находитесь в «кресле водителя»		
	Вы должны постоянно контролировать эти системы: рулить, тормозить или ускоряться по мере необходимости для поддержания безопасности			По запросу системы вы должны взять управление на себя	Эти системы автоматизированного вождения не потребуют от вас управления	
	Системы помощи водителям			Системы автоматизированного вождения		
Что делают эти системы?	Эти системы могут предупреждать или предоставлять кратковременную помощь	Эти системы обеспечивают помощь в рулевом управлении ИЛИ торможении/ ускорении	Эти системы обеспечивают помощь в рулевом управлении ИЛИ торможении/ ускорении	Эти системы могут управлять автомобилем в ограниченных условиях и не будут работать, пока не будут выполнены все необходимые условия		Эти системы могут управлять автомобилем в любых условиях
Пример использования систем	<ul style="list-style-type: none"> автоматическое экстренное торможение предупреждение о слепых зонах предупреждение о выходе из полосы движения 	<ul style="list-style-type: none"> удержание в полосе движения ИЛИ ЖЕ адаптивный круиз-контроль 	<ul style="list-style-type: none"> удержание в полосе движения А ТАКЖЕ адаптивный круиз-контроль (одновременно) 	<ul style="list-style-type: none"> ассистент движения в пробках 	<ul style="list-style-type: none"> беспилотное местное такси педали и рулевое колесо могут отсутствовать 	<ul style="list-style-type: none"> то же, что на уровне 4, но система может использоваться в любых условиях

Рис. 1. Уровни автоматизации согласно SAE J3016-2021 [Источник: 32, 39, 43]

Методы двух и трех осей. Серьезные исследования понятия автономности были проведены военными США. Еще в начале 21 века в военных ведомствах началась разработка технологий, моделей и методов оценки уровня автономности боевых аппаратов, которые

используются и развиваются до последнего времени. Концепция оценки уровней автономии военных беспилотных аппаратов базируется на следующих факторах:

1. Человеческий интерфейс, т.е. уровень зависимости от человека, может быть оценен с помощью таких показателей, как время и частота взаимодействия, рабочая нагрузка оператора, уровни квалификации, инициирование робота и т.д.
2. Сложность миссии, измеряется с помощью таких показателей, как уровни выполнения подзадач, принятия решений и совместной работы, требования к знаниям и восприятию, эффективность планирования и исполнения и т.д.
3. Сложность окружающей среды, может быть измерена с помощью размера препятствий, плотности и движения, типов местности, характеристик городского движения, способности распознавать друзей / врагов / случайных прохожих и т.д.

Указанные факторы касаются беспилотных систем, как мобильных, так и стационарных. Включают следующие категории оцениваемых средств: беспилотные наземные транспортные средства, беспилотные летательные аппараты, беспилотные подводные транспортные средства, беспилотные надводные транспортные средства, необслуживаемые боеприпасы и необслуживаемые наземные датчики.

Графическое представление этой концепции приведено на рис. 2.

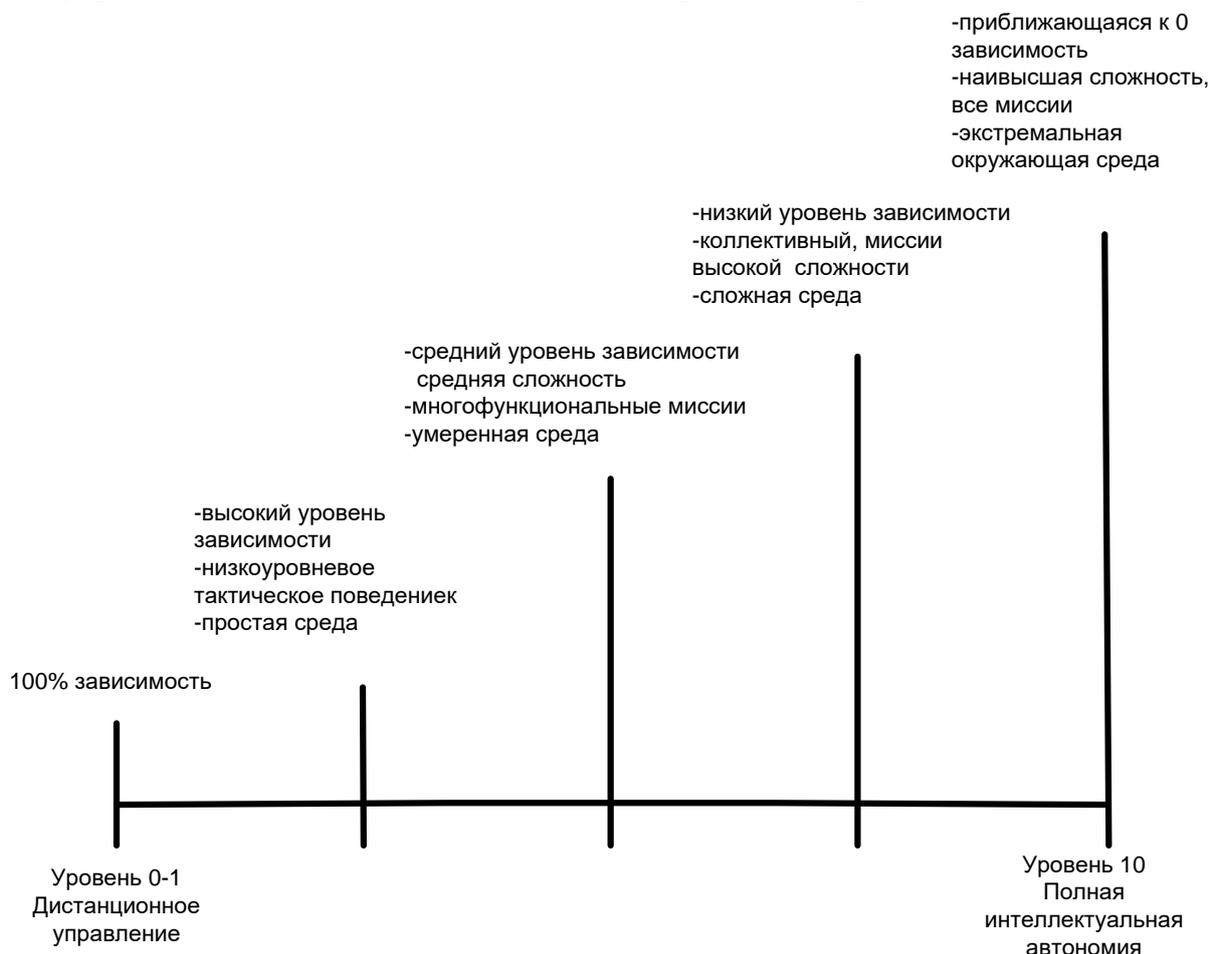


Рис. 2. Уровни автономности [Источник: 44]

Метод двух осей ALC. Шкала уровней автономного управления по двум параметрам ACL, опубликованный в технических отчетах Министерства обороны США по беспилотным летательным аппаратам 2001-2030 гг. [26-28], является наиболее репрезентативным методом, в котором горизонтальная ось – это время в период от 1955 по 2025 г.г. с шагом 10 лет, а ось ординат – уровень автономности беспилотной системы (10 уровней). Этот метод может

наглядно продемонстрировать цели, а также прогнозные варианты разработки беспилотных средств относительно эпохи развития соответствующего уровня автономии.

Метод трех осей ALFUS. В 2001-2004 годах Национальным институтом стандартов и технологий США (NIST) был опубликован ряд фреймворков, в которых автономия также характеризуется указанными выше тремя факторами. На основе фреймворков разработан метод оценки уровня автономности беспилотной системы ALFUS (Autonomy Levels for Unmanned Systems), предложенный в [29-31], который является типичной системой оценивания по трем переменным. Показатели автономности (наборы метрик), определяющие уровень автономности, как показано на рис. 3, сведены в «пространство» автономности».



Рис. 3. Показатели для определения уровня автономности, предложенные группой ALFUS («пространство автономии») [Источник: 29-31, 44]

Изогнутые линии указывают на то, что пользователи для определения результирующих уровней автономности каждого из средств могут руководствоваться некоторыми сложными алгоритмами, в отличие от простых, средневзвешенных. Кривые линии также подразумевают, что они могут быть использованы для определения максимальных возможностей, т.е. беспилотное средство может работать при любой комбинации сложности / затрудненности/ независимости, которая лежит на поверхностях или под ними.

В работе [20] описан метод оценки уровня автономности для беспилотных морских судов, в котором три базовых фактора из фреймворка ALFUS достаточно подробно декомпозированы еще тремя уровням. На рис. 4 для примера показана онтология фактора «Сложность окружающей среды»; описание остальных факторов можно найти в указанном источнике.

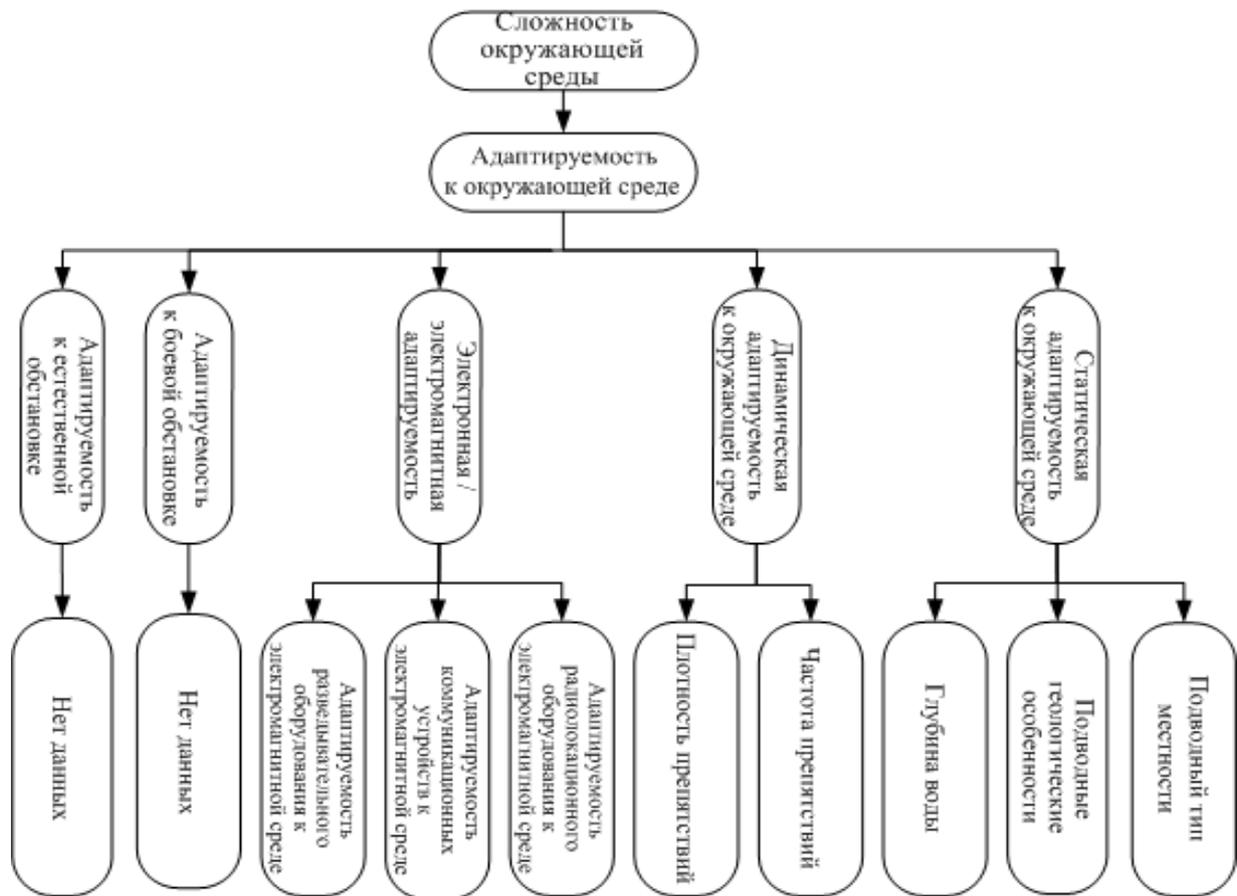


Рис. 4. Онтология фактора «Сложность окружающей среды» фреймворка ALFUS

Интегральный метод LOA для самоконфигурируемых роботов (ТАЕV).

Самореконфигурируемые (SR) роботы – это машины, которые могут изменять свою морфологию в соответствии с предписанными требованиями или адаптацией к окружающей среде в целях обеспечения их мультифункциональности, эволюционированности и выживаемости [45].

Обычно самореконфигурируемые роботы являются модульными роботами (MSR), компоненты которых могут автономно организовываться в различные конфигурации. Модуль определяется, как фундаментальная единица модульного робота, где каждый модуль является независимым роботом, который может реагировать на команду. Конфигурация представляет собой связанный набор модулей, которые действуют, как единый тождественный или сформированный робот.

Самореконфигурируемые роботы основаны на реконфигурируемости механизма и уровне автономности для реконфигурации. При этом реконфигурируемость механизма роботов делится на два типа:

1. Интерреконфигурируемость (Inter-Reconfigurability) – конгрегация модульных роботов, способных формировать различные морфологии посредством непрерывного процесса сборки/разборки на уровне его модульных частей.
2. Внутрисистемная реконфигурируемость (Intra-Reconfigurability), т.е. изменение конфигурации робота за счет адаптивности морфологии, а не за счет сборки/разборки его роботизированных компонентов. Возможность реконфигурации обеспечивает мультимодальное перемещение, где каждая преобразованная конфигурация соответствует определенному режиму локомоции.

Реконфигурируемость самонастраивающихся роботов определяется не только реконфигурируемостью механизма, но и уровнем его *автономности*, под которой понимается степень, в которой самореконфигурируемый робот может *ощущать* окружающую среду, *планировать* свою конфигурацию на основе этой среды и *действовать*, чтобы трансформироваться в определенные конфигурации в этой среде с намерением достичь некоторой цели (заданной человеком или созданной самим роботом) [45].

На основе этого определения, а также с учетом введенной выше типологии MSR, в [45] предлагается метод оценки уровня автономности, названный фреймворком TAEV для самонастраивающихся роботов и основанный на распознавании типа механизма и уровня автономности в аспекте реконфигурируемости этих роботов (см. рис. 5). В основе метода лежит триадная система, в которой оси X и Y представляют собой интер- и внутривнутриреконфигурируемость соответственно, а ось Z представляет собой уровень способности к автономной реконфигурируемости, которая рассматривается с точки зрения трех связанных друг с другом характеристик: чувствование внешней среды, (sense environment), планирование действий (plan configuration), совершение реконфигурации (act reconfiguration); 10 уровней реконфигурируемости автономности варьируются от ручного телеуправления к полностью автономным системам.

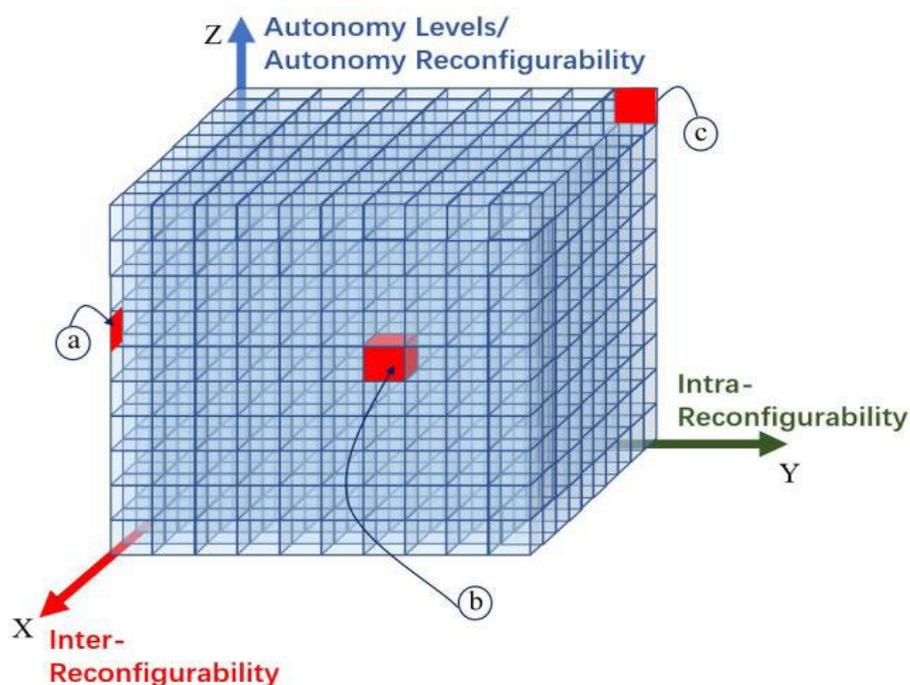


Рис. 5. Визуальное представление трех осей предлагаемой структуры TAEV, где вдоль каждой оси показано десять категорий, а каждый куб представляет категорию, к которой принадлежит самореконфигурируемый робот [Источник 45]

Шкала оценки уровня автономности к рис. 5 показана на рис. 6. Таким образом, изложенный фреймворк включает как уровневый подход LOA (оценка автономной реконфигурируемости), так и осевой метод.

Метод паутины. Метод демонстрируется на примере оценки автономности реконфигурируемости для самореконфигурируемых роботов (рис. 7) [45]. Очевидно, что выбор осей паутины осуществляется экспертным путем в зависимости от целей исследования и предметной области.

Autonomy Reconfigurability	Level	Functions			Description
		Sense	Plan	Act	
Manual teleoperated reconfiguration	0	M	M	M	The task including sensing the environment and monitoring the system, generating plans/options/goals, and implementation are performed manually.
Pre-defined reconfiguration pattern	1	M/R	M/R	M/R	The human is assisted by the robot to determine the reconfiguration options. However, human carries sensing and planning. The robot then implements the reconfiguration that the human chooses.
Teleoperation assisted by reconfiguration	2	M/R	M/R	M/R	Human intervention is there in selecting the reconfiguration option suggested by the robot during operating it remotely.
Task intervention by reconfiguration	3	M/R	M/R	R	The robot senses the surrounding and decides to involve in the task in the way of reconfigurations.
Reconfiguration decision Support	4	M/R	R	R	Both the robot and human sense the environment and plan for reconfiguration. Whereas, the task is selected manually and command to implement it is given to robot.
Shared control of reconfiguration with human initiative	5	M/R	R	R	The robot does all aspects of the task. Whereas, the human may intervene and influence the robot's progress in reconfiguration.
Shared control of reconfiguration with robot initiative	6	M/R	M/R	R	The robot performs all part of assignment. In case the robot encounters difficulties, the manual intervention prompts for setting new configurations.
Supervisory control of reconfiguration	7	M/R	R	M/R	The robot performs all parts of the assignment, but manual override option is available in setting new configurations.
Executive control of reconfiguration	8	R	M/R	R	The human may give a set goal. The robot sense, plan and implement reconfiguration autonomously.
Fully autonomous reconfigurability	9	R	R	R	All aspects of the task are performed by the robot without any human intervention.
Collaborative reconfigurability	10	R	R	R	The robot not only can perform tasks on its own but also can collaborate and help human using reconfiguration.

M: Manual or human R:Robot, Sense: Sense environemnt, Plan: plan configuration, Act: Act or execute reconfiguration

Рис. 6. Таблица уровней автономности реконфигурируемости для характеристик чувствования, планирования, действия по реконфигурируемости [Источник 45]

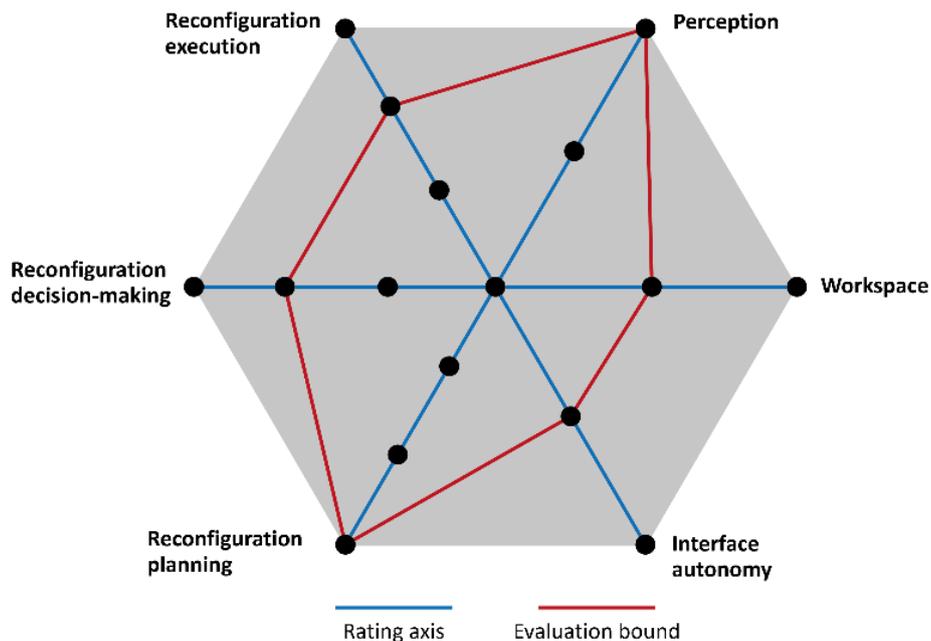


Рис. 7. Модель оценки «паутины» для оценки автономности реконфигурируемости самореконфигурируемых роботов [Источник 45]

Предлагаемая в [45] модель оценки паутины состоит из шести показателей производительности, которые представляют собой:

1. Восприятие, оценивает сенсорную способность самореконфигурируемого робота. Это не прямой фактор, связанный с реконфигурируемостью, но показывающий потенциал к автономной реконфигурации, в том смысле, что робот с большим уровнем восприятия сможет выполнить реконфигурацию автономно по сравнению с человеком с более слабой способностью к восприятию. Классифицируется по двум градациям (0 - 2), где 0 обозначает отсутствие датчиков; 1 – среднюю способность восприятия; 2 – полную способность восприятия.

2. Рабочее пространство, классифицируется по двум градациям (0 - 2), где 0 обозначает точку, 1 – реконфигурация может происходить только в 2D-плоскости.
3. Уровень автономности интерфейса представлен двумя градациями (0 - 2), где 0 – ручное присоединение или отсоединение; 1 – ручное присоединение и автономное отсоединение; 2 – автономное присоединение и отсоединение.
4. Планирование реконфигурации, обозначается тремя степенями (0 - 3). Этот показатель оценивает автономность в аспекте планирования реконфигурации. 0 – у робота нет возможности планирования; 1 – робот обеспечивает поддержку для планирования стратегии реконфигурации; 2 – робот руководит разработкой стратегии планирования, но человек контролирует процесс; 3 – робот разрабатывает стратегию планирования без какого-либо вмешательства человека.
5. Принятие решений о реконфигурации, обозначается тремя степенями (0 - 3), где 0 – решение принимается исключительно людьми; 1 – робот предоставляет консультативное решение; 2 – робот руководит принятием решений, но человек контролирует процесс; 3 – робот принимает решение без какого-либо вмешательства человека.
6. Выполнение реконфигурации, обозначается тремя степенями (0 - 3). 0 – выполнение выполняется исключительно людьми; 1 – робот обеспечивает вспомогательные действия для выполнения; 2 – робот руководит выполнением, но человек контролирует процесс; 3 – робот проводит выполнение без какого-либо вмешательства человека.

После определения значений индикаторов по всем осям, автономность реконфигурируемости I_{AUTO} может быть рассчитана по формуле

$$I_{AUTO} = \frac{A_{ocp}}{A_{total}} * 10,$$

где A_{ocp} – занимаемая площадь, полученная путем соединения значений оценок индикаторов для конкретного самореконфигурируемого робота, а именно площадь внутри красной границы оценки; A_{total} – общая площадь шестиугольника.

Модель оценки наземных транспортных средств на основе нечеткой логики.

Модель нечеткой комплексной оценки, разработанная китайскими исследователями [35-37], позволяет находить количественные оценки поведения при движении наземных транспортных средств в условиях нечетких и трудно поддающихся количественной оценке ситуациях. В основе модели лежит известный метод анализа иерархий Т.И. Саати. Предлагаемая в [37] система оценки больше связана с тем, насколько качественно автономные наземные транспортные средства выполняют поставленную задачу, а не с тем, выполнит ли транспортное средство поставленную задачу в отведенное время. С помощью метода нечеткой оценки авторы предлагают количественно оценить как общие, так и индивидуальные технические характеристики автономных наземных транспортных средств при автономном движении.

На рисунке 8 представлено критериальное дерево многоуровневой комплексной системы оценки в рамках модели, которое отображает:

1. Аспекты оценки с точки зрения: а) базового восприятия беспилотными наземными транспортными средствами сложности окружающей среды, б) интеллектуального поведенческого принятия решений при восприятии препятствий окружающей среды.
2. Элементы оценки: VCB – поведение транспортного средства при его самоуправлении; BDB – базовое поведение в процессе вождения; BTV – базовое поведение при дорожном движении; ADB – уровень интеллектуальности при принятии решений; НТВ – поведение в условиях интенсивного дорожного движения.

3. Факторы оценки: начало движения; парковка; удержание полосы движения; препятствие; разворот; остановочная линия; запрещение движения задним ходом; соблюдение дистанции; пересечение; динамическое планирование; GPS-навигация; распознавание дорожных знаков; распознавание сигналов; экстренное торможение.

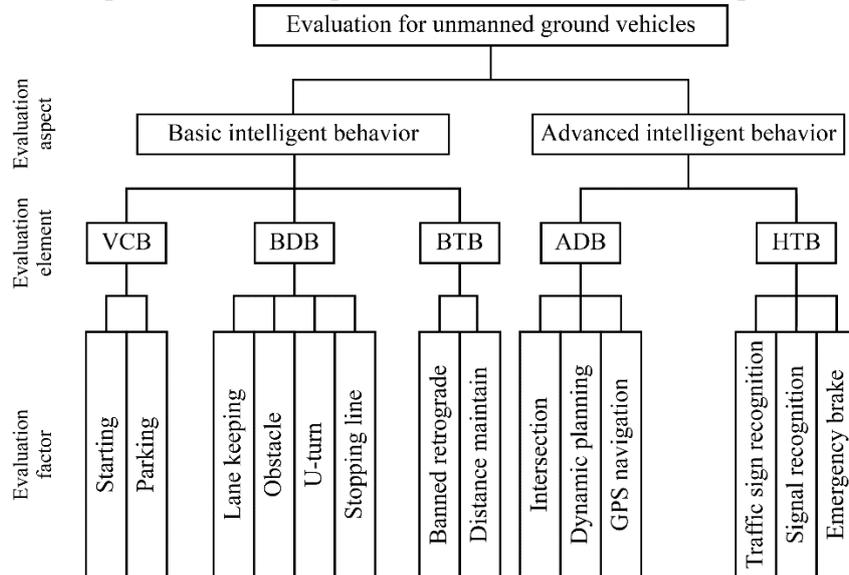


Рис. 8. Критериальная система модели нечеткой комплексной оценки [Источник 37]

На рисунке 9 представлена таблица результатов оценки движения автономных наземных транспортных средств, которые сделаны методом нечеткой оценки.

Evaluation aspect	Evaluation element	Evaluation factor	Evaluation grade V											
			v_1	v_2	v_3	v_4	v_5							
No i	u_i	a_i	No j	u_{ji}	a_{ji}	No k	u_{kij}	a_{kij}	Fuzzy matrix					
									Very good	Good	So-so	Bad	Very bad	
1	BIB	0.33	1	VCB	0.13	1	Starting	0.33	0.2	0.7	0.1	0	0	
						2	Parking	0.67	0.1	0.4	0.3	0.2	0	
	2	BDB	0.59	1	BDB	0.59	1	Lane Keeping	0.21	0	0.5	0.3	0.2	0
							2	Obstacle	0.11	1	0	0	0	0
							3	U-turn	0.57	0	0.4	0.6	0	0
							4	Stopping line	0.11	0	0	0	0.2	0.8
	3	BTB	0.28	1	BTB	0.28	1	Banned retrograde	0.7	0	0	0.2	0.3	0.5
							2	Distance maintain	0.25	0.3	0.7	0	0	0
	2	AIB	0.67	1	ADB	0.67	1	Intersection	0.31	0.2	0.6	0.2	0	0
							2	Dynamic planning	0.58	0.4	0.6	0	0	0
3							GPS navigation	0.11	0.3	0.7	0	0	0	
2		HTB	0.33	1	HTB	0.33	1	Traffic sign recognition	0.25	0	0	0	0	1
							2	Signal recognition	0.5	0	0	0	0	1
							3	Emergency brake	0.25	0.2	0.8	0	0	0

Рис. 9. Результаты оценки движения автономных наземных транспортных средств, полученных на основе модели нечеткой комплексной оценки [Источник 37]

Заключение. В работе рассмотрены различные подходы к пониманию термина «автономия», описаны понятия «сильная» и «слабая» автономность ТС. Показано, что автоматизированное ТС приобретает свойство автономности в том случае, когда ее программное обеспечение включает алгоритмы искусственного интеллекта. Дается подробный обзор методов и моделей оценки автоматизации для различных предметных областей. Представлены зарубежные и отечественные источники, содержащие различные

критерии оценки уровня автономности ТС. Однако все они основаны на экспертных субъективных оценках и достаточно сильно зависят от предметной области.

Таким образом, нужны более строгие методы оценок уровня автономности, как при проектировании автономных систем, так и при их внедрении. При этом, поскольку, с одной стороны, свойство «автономность» надо рассматривать, как результат развития процессов автоматизации когнитивных форм деятельности человека, а с другой – как свойство интеллектуальных систем, его содержание определяется как внутренним, так и внешним контентом. Поэтому, как сложное понятие, его можно характеризовать онтологической моделью, то есть структурой определяющих его параметров. Дальнейшие исследования и развитие результатов статьи предполагается направить на построение семантических структур с учетом таких свойств, как ментальные характеристики, мотивация, степень удовлетворенности выбора, цели, обязательства и т.п.

Следует также отметить, что, если «автономность» ТС выступает, как свойство искусственного разума за счет внедрения элементов искусственного интеллекта, то в идеальном случае необходимо разрабатывать методы, основанные на критериях оценивания степени интеллектуальности алгоритмов программного обеспечения таких систем. Формальных же методов, посвященных измерению уровней сильной автономности с точки зрения содержания в алгоритмах интеллектуальных качеств, имитирующих когнитивные способности человеческого мозга, как показал анализ источников, не существует. Исследования в этой области были бы крайне перспективны, т.к. позволили бы перейти от субъективизма в оценках к обоснованным суждениям.

Список источников

1. Болотова Л.С. Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях / Л.С. Болотова – ФГБОУ ВПО РГУИТП, ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информатика». – М.: Финансы и статистика. – 2012. – 664 с.
2. Сачков Ю.В. Автономность / Ю.В. Сачков, М.А. Можейко // Гуманитарный портал: концепты. – 2002-2025. – URL: <https://gtmarket.ru/concepts/7169> (дата обращения: 20.08.2025).
3. Parasuraman, R. and Riley, V., 1997. Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human factors*, 39(2), pp.230-253.
4. IEC 60050-351:2013. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 351: Control Technology.
5. Rødseth Ø.J., Vagia M. A taxonomy for autonomy in industrial autonomous mobile robots including autonomous merchant ships. *IOP Conference series: materials science and engineering*, 2020, vol. 929, p. 012003. DOI: 10.1088/1757-899X/929/1/012003.
6. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019/ИСО 8373:2012 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. – Москва, Стандартинформ, 2023.
7. Нестеров С.А. Адаптивные системы управления: Конспект лекций. – СПб.: СПбГПУ, 2005. – 90 с.
8. Rødseth Ø.J. Defining ship autonomy by characteristic factors. *Proceedings of the 1st International conference on maritime autonomous surface ships*. SINTEF Academic Press, 2019.
9. Liu S., Ru Y., Wang K. The new progress in the evaluation method of Drone autonomy. *Aerodynamic Missile Journal*, 2019, no. 2, pp. 43–49.
10. Gunderson J., Gunderson L. Intelligence ≠ Autonomy ≠ Capability. *The Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*, 2004.
11. Clough B. Metrics, schmetrics! How the heck do you determine a UAV's autonomy anyway. *The Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent System Workshop*, 2002.
12. Yan Y., Tang Z., Lu J. Research on autonomy evaluation of ground intelligent robot. *Journal of Huazhong University of science & technology*, 2011, vol. 39, Sup. II, pp. 68-71.
13. ISO. Input document to IMO Maritime Safety Committee, Session 102. Regulatory Scoping Exercise for the Use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS), Proposed terminology for MASS. *International Organization for Standardization*, 2020.
14. ГОСТ Р 60.6.0.1-2021. Роботы и робототехнические устройства. Сервисные мобильные роботы. Уровни автономности. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2021.

15. ГОСТ Р 59277-2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта. – Москва: Стандартинформ, 2021.
16. Beer J.M., Fisk A.D., Rogers W.A. Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction. *Journal of Human-Robot Interaction*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 74-99, DOI: 10.5898/JHRI.3.2.Beer.
17. Autonomic Computing. Overview. The 8 Elements. 2001. Available at: <https://web.archive.org/web/20111231083818/http://www.research.ibm.com/autonomic/overview/elements.html> (accessed: 08.20.2025).
18. Huang H., Albus J., Messina E. et al. Specifying autonomy levels for unmanned systems: Interim report. *Proceedings of the 2004 SPIE Defense and Security Symposium*, 2004, pp. 386–397, DOI:10.1117/12.552074.
19. Wang Y., Liu J., Evaluation methods for the autonomy of unmanned systems. *Chinese Science Bulletin*, 2012, vol. 57(15), pp. 1290–1299, DOI: 10.1007/s11434-012-5183-2.
20. Lei S., Chen J., Hu J., et al. An Evaluation method of autonomy for marine unmanned vehicles. 2020 IEEE 9th Data driven control and learning systems conference, 2020, pp. 99-104, DOI: 10.1109/DDCLS49620.2020.9275092.
21. Бойченко А.В. Методологические аспекты целеполагания при переходе к цифровой экономике / А.В. Бойченко, О.В. Лукинова // *Открытое образование*, 2018. – Т. 24. – № 4. – С. 74-83.
22. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка формирования целей и стратегий. – М.: СИНТЕГ, 2005. – 224 с.
23. Sheridan T.B., Verplank W.L. *Human and computer control of undersea teleoperators*. Cambridge, MA: MIT Man-Machine Systems Laboratory, 1978.
24. Sheridan T.B. *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. The MIT Press, 1992.
25. Sheridan T.B. Automation, authority and angst – revisited. *Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting*, 1991, pp. 18–26.
26. Office of the Secretary of Defense, *Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2000–2025*, Technical Report, 2001.
27. Office of the Secretary of Defense, *Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2002–2027*, Technical Report, 2002.
28. Office of the Secretary of Defense, *Unmanned Aircraft System Roadmap 2005–2030*, Technical Report, 2005.
29. Huang H., Albus J., Messinan E., et al. Specifying autonomy levels for unmanned systems: Interim report. *The Proceedings of the 2004 SPIE Defense and security symposium conference*, 2004, pp. 386–397.
30. Huang H., Pavak K., Novak B. et al. A framework for autonomy levels for unmanned systems (ALFUS). *Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America Conference*, 2005, pp. 849–863.
31. Huang H. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) framework: Safety and application issues. *The Proceedings of the performance metrics for intelligent systems workshop*, 2007, pp. 48–53.
32. SAE International. *Surface Vehicle Recommended Practice J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. 2016, DOI: 10.4271/J3016_201609.
33. Lloyd's Register. *Cyber-enabled ships Ship Right procedure – autonomous ships*. First edition, July 2016.
34. IEC 62267:2009. *Automated urban guided transport – Safety requirements*. International Electrotechnical Commission, 2009.
35. Yang Z., Zhang R. Fuzzy evaluated method for the autonomy levels of unmanned system. *Journal of Chinese computer systems*, 2009, vol. 30, no. 10, pp. 2043–2047.
36. Li J., Tang Z., Tan Y., et al. Research on autonomous capability evaluation of unmanned ground vehicles. *Science discovery*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 12–20, DOI:10.11648/j.sd.20160401.13.
37. Sun Y., Tao G., Xiong G., et al. The Fuzzy-AHP Evaluation Method for Unmanned Ground Vehicles. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 653-658, DOI:10.12785/amis/070232.
38. Young L., Yetter J., Guynn M. System analysis applied to autonomy: Application to high-altitude long-endurance remotely operated aircraft. *Proceedings of Infotech@ Aerospace Conference*, 2005, p. 7103, DOI: 10.2514/6.2005-7103.
39. SAE J3016 (2018). Системы автоматизированного управления движением АТС. Классификация, термины и определения. – SAE, 2018. – 35 с. – DOI: 10.4271/J3016_201806.
40. Frohm J., Stahre J., Winroth M. Levels of Automation in Manufacturing. *International Journal of Ergonomics and Human Factors*, 2008, vol. 30, no. 3, pp. 287-299.
41. Кораблев И.Г. Оценка уровня автоматизации бизнес-процессов предприятия / И.Г. Кораблев // *Вестник Череповецкого государственного университета*, 2016. – № 1. – С. 17-24.
42. Кузьмин Ю.Б. Шкалирование уровня автоматизации на производстве / Ю.Б. Кузьмин // *Информационные технологии*, 2020. – Т. 26, № 2. – С. 116-127. – DOI: 10.17587/it.26.116-127.
43. Шадрин С.С. Аналитический обзор стандарта SAE J3016 «Классификация, термины и определения систем автоматизированного управления движением АТС» с учетом последних изменений / С.С. Шадрин, А.А.

- Иванова // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура, 2019. – № 3(21). – URL: https://www.adi-adi.ru/madi/article/download/811/pdf_478 (дата обращения: 13.07.2025).
44. Соколов С.М. Сравнительный анализ степени автономности робототехнических комплексов / С.М. Соколов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2023. – № 1. – С. 65-76. – DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-65-76.
45. Tan N., Hayat A.A., Elara M.R., Wood K.L. A Framework for Taxonomy and Evaluation of Self-Reconfigurable Robotic Systems. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 13949-13964, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965327.

Лукинова Ольга Васильевна. Доцент, доктор технических наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, ведущий научный сотрудник, Российский технологический университет МИРЭА, профессор кафедры информационной безопасности. Направления исследований: программная и системная инженерия, принятие решений, искусственный интеллект, инженерия знаний, информационная безопасность. AuthorID 142037, SPIN 4361-0837, ORCID 0000-0002-5576-7749. lobars@mail.ru. ИПУ РАН, 117997, ГСП-7, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 45

UDC 004.896 004.031

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.002

Overview of the current state of understanding the concept of “autonomy of technical means”

Olga V. Lukinova

Institute of Control Sciences RAS,

Russia, Moscow, lobars@mail.ru

Abstract. The article provides an overview of some issues related to the technical devices' autonomy subject domain in its current state. Today, this concept does not have a clear methodological or formalized definition, which, in the context of the transition to digital technologies, seems to be a significant problem when designing devices with artificial intelligence elements and a given degree of autonomy. Various approaches to understanding the term "autonomy" are described, emphasizing that autonomy should be viewed as a further development of a technical device's automation properties, along with its automatism and adaptability. The concepts of "strong autonomy" and "weak autonomy," used by some foreign experts and related to the automation properties of a technical system, are discussed. Foreign and domestic sources containing various criteria for assessing the level of autonomy are presented. It is shown that the evaluation indicators are purely expert and informal in nature and do not relate to the essential quality of the autonomy of a technical device, but to the result of its functioning. Thus, when deciding on the assessment of the device autonomy level, decision-making algorithms in unstructured areas should be used, based on the convolution of a vector criterion, which is hierarchical in nature. Thus, the purpose of this work is to show, by analyzing numerous sources, the limitations of the scientific and methodological apparatus for assessing such a complex concept as device autonomy, which today is based solely on the subjective judgments of the observer, as well as the need to move to formal or at least formalized methods.

Keywords: automation, autonomy, technical system, assessment of autonomy level

References

1. Bolotova L.S. Sistemy iskusstvennogo intellekta: modeli i tekhnologii, osnovannye na znaniyakh [Artificial intelligence systems: models and technologies based on knowledge]. Moscow, Finansy i statistika [Finance and statistics] Publ., 2012, 664 p.
2. Sachkov Yu.V., Mozheiko M.A. Avtonomnost' [Autonomy]. Gumanitarnyy portal: kontsepty [Humanities Portal: Concepts], 2002-2025. Available at: <https://gtmarket.ru/concepts/7169> (accessed: 08/20/2025).
3. Parasuraman, R. and Riley, V., 1997. Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. Human factors, 39(2), pp.230-253.
4. IEC 60050-351:2013. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 351: Control Technology.

5. Rødseth Ø.J., Vagia M. A taxonomy for autonomy in industrial autonomous mobile robots including autonomous merchant ships. IOP Conference series: materials science and engineering, 2020, vol. 929, p. 012003. DOI: 10.1088/1757-899X/929/1/012003.
6. GOST R 60.0.0.4-2019/ISO 8373:2012 Roboty i robototekhnicheskie ustrojstva. Terminy i opredeleniya [Robots and robotic devices. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform, 2023.
7. Nesterov S.A. Adaptivnyye sistemy upravleniya: Konspekt lektsiy [Adaptive control systems: lecture notes]. Saint Petersburg, SPbGPU [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University] Publ., 2005, 90 p.
8. Rødseth Ø.J. Defining ship autonomy by characteristic factors. Proceedings of the 1st International conference on maritime autonomous surface ships. SINTEF Academic Press, 2019.
9. Liu S., Ru Y., Wang K. The new progress in the evaluation method of Drone autonomy. Aerodynamic Missile Journal, 2019, no. 2, pp. 43–49.
10. Gunderson J., Gunderson L. Intelligence ≠ Autonomy ≠ Capability. The Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, 2004.
11. Clough B. Metrics, schmetrics! How the heck do you determine a UAV's autonomy anyway. The Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent System Workshop, 2002.
12. Yan Y., Tang Z., Lu J. Research on autonomy evaluation of ground intelligent robot. Journal of Huazhong University of science & technology, 2011, vol. 39, Sup. II, pp. 68-71.
13. ISO. Input document to IMO Maritime Safety Committee, Session 102. Regulatory Scoping Exercise for the Use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS), Proposed terminology for MASS. International Organization for Standardization, 2020.
14. GOST R 60.6.0.1-2021 Roboty i robototekhnicheskie ustrojstva. Servisnye mobil'nye roboty. Urovni avtonomnosti. Terminy i opredeleniya [Robots and robotic devices. Service mobile robots. Levels of autonomy. Terms and definitions] Moscow, Standartinform Publ., 2021.
15. GOST R 59277—2020 Sistemy iskusstvennogo intellekta. Klassifikaciya sistem iskusstvennogo intellekta [Artificial Intelligence Systems. Classification of Artificial Intelligence Systems] Moscow, Standartinform Publ., 2021.
16. Beer J.M., Fisk A.D., Rogers W.A. Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction. Journal of Human-Robot Interaction, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 74-99, DOI: 10.5898/JHRI.3.2.Beer.
17. Autonomic Computing. Overview. The 8 Elements. 2001. Available at: <https://web.archive.org/web/20111231083818/http://www.research.ibm.com/autonomic/overview/elements.html> (accessed: 08.20.2025).
18. Huang H., Albus J., Messina E. et al. Specifying autonomy levels for unmanned systems: Interim report. Proceedings of the 2004 SPIE Defense and Security Symposium, 2004, pp. 386–397, DOI:10.1117/12.552074.
19. Wang Y., Liu J., Evaluation methods for the autonomy of unmanned systems. Chinese Science Bulletin, 2012, vol. 57(15), pp. 1290–1299, DOI: 10.1007/s11434-012-5183-2.
20. Lei S., Chen J., Hu J., et al. An Evaluation method of autonomy for marine unmanned vehicles. 2020 IEEE 9th Data driven control and learning systems conference, 2020, pp. 99-104, DOI: 10.1109/DDCLS49620.2020.9275092.
21. Boychenko A.V., Lukinova O.V. Metodologicheskiye aspekty tselepolaganiya pri perekhode k tsifrovoy ekonomike [Methodological aspects of goal setting in the transition to a digital economy]. Otkrytoye obrazovaniye [Open education], 2018, vol. 24, no. 4, pp. 74-83.
22. Trakhtengerts E.A. Komp'yuternaya podderzhka formirovaniya tseley i strategiy [Computer Support for Forming Goals and Strategies]. Moscow, SINTEG Publ., 2005, 224 p.
23. Sheridan T.B., Verplank W.L. Human and computer control of undersea teleoperators. Cambridge, MA: MIT Man-Machine Systems Laboratory, 1978.
24. Sheridan T.B. Telerobotics, automation, and human supervisory control. The MIT Press, 1992.
25. Sheridan T.B. Automation, authority and angst – revisited. Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting, 1991, pp. 18–26.
26. Office of the Secretary of Defense, Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2000–2025, Technical Report, 2001.
27. Office of the Secretary of Defense, Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2002–2027, Technical Report, 2002.
28. Office of the Secretary of Defense, Unmanned Aircraft System Roadmap 2005–2030, Technical Report, 2005.
29. Huang H., Albus J., Messinan E., et al. Specifying autonomy levels for unmanned systems: Interim report. The Proceedings of the 2004 SPIE Defense and security symposium conference, 2004, pp. 386–397.
30. Huang H., Pavak K., Novak B. et al. A framework for autonomy levels for unmanned systems (ALFUS). Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America Conference, 2005, pp. 849–863.
31. Huang H. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) framework: Safety and application issues. The Proceedings of the performance metrics for intelligent systems workshop, 2007, pp. 48–53.

32. SAE International. Surface Vehicle Recommended Practice J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. 2016, DOI: 10.4271/J3016_201609.
33. Lloyd's Register. Cyber-enabled ships Ship Right procedure – autonomous ships. First edition, July 2016.
34. IEC 62267:2009. Automated urban guided transport – Safety requirements. International Electrotechnical Commission, 2009.
35. Yang Z., Zhang R. Fuzzy evaluated method for the autonomy levels of unmanned system. Journal of Chinese computer systems, 2009, vol. 30, no. 10, pp. 2043–2047.
36. Li J., Tang Z., Tan Y., et al. Research on autonomous capability evaluation of unmanned ground vehicles. Science discovery, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 12–20, DOI:10.11648/j.sd.20160401.13.
37. Sun Y., Tao G., Xiong G., et al. The Fuzzy-AHP Evaluation Method for Unmanned Ground Vehicles. Applied Mathematics & Information Sciences, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 653-658, DOI:10.12785/amis/070232.
38. Young L., Yetter J., Guynn M. System analysis applied to autonomy: Application to high-altitude long-endurance remotely operated aircraft. Proceedings of Infotech@Aerospace Conference, 2005, p. 7103, DOI: 10.2514/6.2005-7103.
39. SAE J3016 (2018). Sistemy avtomatizirovannogo upravleniya dvizheniem ATS. Klassifikatsiya, terminy i opredeleniya [Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles]. SAE, 2018, 35 p., DOP: 10.4271/J3016_201806
40. Frohm J., Stahre J., Winroth M. Levels of Automation in Manufacturing. International Journal of Ergonomics and Human Factors, 2008, vol. 30, no. 3, pp. 287-299.
41. Korablev I.G. Otsenka urovnya avtomatizatsii biznes-protsessov predpriyatiya [Assessment of the level of automation of enterprise business processes]. Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Cherepovets state university], 2016, no. 1, pp. 17-24.
42. Kuzmin Yu.B. Shkalirovaniye urovnya avtomatizatsii na proizvodstve [Scaling the level of automation in production]. Informatsionnyye tekhnologii [Information technologies], 2020, vol. 26, no. 2, pp. 116-127. DOI: 10.17587/it.26.116-127.
43. Shadrin S.S., Ivanova A.A. Analiticheskiy obzor standarta SAE J3016 «Klassifikatsiya, terminy i opredeleniya sistem avtomatizirovannogo upravleniya dvizheniem ATS» s uchetom poslednikh izmeneniy [Analytical review of the SAE J3016 standard "Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles" taking into account the latest changes]. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura [Car. Road. Infrastructure], 2019, no. 3(21). Available at: https://www.adi-adi.ru/madi/article/download/811/pdf_478 (accessed: 07/13/2025).
44. Sokolov S.M. Sravnitel'nyy analiz stepeni avtonomnosti robototekhnicheskikh kompleksov [Comparative analysis of the degree of autonomy of robotic complexes]. Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki [Bulletin of the Southern Federal University. Technical Sciences], 2023, no. 1, pp. 65-76. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-65-76.
45. Tan N., Hayat A.A., Elara M.R., Wood K.L. A Framework for Taxonomy and Evaluation of Self-Reconfigurable Robotic Systems. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 13949-13964, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965327.

Lukinova Olga Vasilyevna. Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Russian Technological University MIREA, Professor of the Department of Information Security. Research areas: software and systems engineering, decision making, artificial intelligence, knowledge engineering, information security. AuthorID 142037, SPIN 4361-0837, ORCID 0000-0002-5576-7749. lobars@mail.ru. IPU RAS, Russia, 117997, GSP-7, Moscow, Varshavskoye Highway, 45.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена после рецензирования 20.12.2025; принята к публикации 10.02.2026.

The article was submitted 12/01/2025; approved after reviewing 12/20/2025; accepted for publication 02/10/2026.

Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта

УДК 004.8:620.9

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.003

Методы построения умных цифровых двойников для проектирования возобновляемых источников энергии

Массель Людмила Васильевна, Цыбиков Алексей Ринчинович, Щукин Никита Игоревич

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, tsibikow@mail.ru

Аннотация. В контексте глобального перехода к низкоуглеродной экономике проектирование объектов возобновляемой энергетики (ВИЭ), таких, как солнечные и ветровые электростанции, требует учета множества сложно прогнозируемых факторов: изменчивости природных ресурсов, рельефа местности, экологических ограничений и экономических параметров. Цифровые двойники (ЦД) представляют собой мощный инструмент для решения этих задач, обеспечивая виртуальное представление физического объекта на всех этапах его жизненного цикла. В статье рассматриваются предлагаемые методы построения умных цифровых двойников (Smart Digital Twin, SDT) используемых при проектировании объектов возобновляемой энергетики. В качестве основы предлагается модифицированная модель цифрового двойника, фундаментом которой служат онтологические модели. Эти модели формализуют ключевые понятия, сущности и их атрибуты в предметной области возобновляемой энергетики, а также семантические отношения между ними. Онтология обеспечивает единый глоссарий и структуру данных, что критически важно для интеграции разнородных информационных источников и обеспечения взаимопонимания между компонентами системы и специалистами. На следующем этапе описывается её дальнейшее преобразование в модель умного цифрового двойника добавлением интеллектуальных компонентов, таких, как базы знаний, виртуальная среда, модели искусственного интеллекта, схемы и диаграммы. Для описания связей между моделями и компонентами предложено использование фрактальной стратифицированной модели, формализующей структуру знаний и взаимосвязи между онтологическими, информационными и математическими моделями. Подробно описана методика онтологического инжиниринга, адаптированная для задач проектирования цифровых двойников, и метод построения виртуальной среды, позволяющей выполнять отладку, как цифровых двойников, так и умных цифровых двойников в условиях отсутствия постоянной связи с реальным объектом или полного отсутствия реального объекта. Для эмуляции внешних параметров, таких, как погодные условия, предложен модифицированный процесс на основе *CRISP-DM*, обеспечивающий интеграцию моделей машинного обучения. Практическая значимость подхода подтверждена разработкой компонента визуализации для нахождения места оптимального размещения электростанции и её проектирования, использующего интерактивную 3D-модель Земли, спутниковые данные и метеорологические API. Реализованный инструмент демонстрирует возможность проектирования объектов возобновляемой энергетики.

Ключевые слова: цифровой двойник, умный цифровой двойник, возобновляемые источники энергии, фрактальная стратифицированная модель, онтология, машинное обучение, визуализация

Цитирование: Массель Л.В. Методы построения умных цифровых двойников для проектирования возобновляемых источников энергии / Л.В. Массель, А.Р. Цыбиков, Н.И. Щукин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 43-58 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.003.

Введение. С развитием информационных технологий в начале 2000-х годов, концепция цифровых двойников начала активно развиваться. Майкл Гривз из Мичиганского университета предложил идею “цифрового двойника” в контексте управления жизненным циклом продукта [1]. Эта концепция включала в себя реальное и виртуальное пространство, а также механизм обмена информацией между ними.

Современная энергетика переживает трансформацию, связанную с введением в эксплуатацию возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Проектирование систем ВИЭ осложнено стохастическим характером генерации и необходимостью обеспечения

надежности энергосистем. В этих условиях актуализируется поиск новых инструментов, способных оперативно наблюдать, прогнозировать и управлять работоспособностью объектов, среди таких инструментов концепция цифровых двойников (ЦД) занимает ключевое место [2, 3]. В Российской Федерации предложен стандарт для построения цифровых двойников: в 2021 г. принят ГОСТ Р 57700.37 – 2021. «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий». Несмотря на то, что он ориентирован преимущественно на изделия машиностроения, основными его положениями можно руководствоваться и при построении ЦД в энергетике [4].

Применение онтологических моделей в архитектуре цифрового двойника способствует достижению семантической согласованности его компонентов. Такой подход позволяет формализовать структурные и функциональные взаимосвязи элементов моделируемой системы, что минимизирует неоднозначность интерпретации данных и обеспечивает условия для интеграции гетерогенных источников информации [5, 6].

Проектирование архитектуры цифрового двойника энергетической системы требует комплексного подхода, охватывающего вопросы как организации информационного обеспечения, так и разработки математического аппарата. Как отмечается в [7], ключевым аспектом является создание структурированной системы сбора, обработки и хранения данных, обеспечивающей достоверность и своевременность информационных потоков.

Дальнейшее развитие математического обеспечения цифровых двойников связано с внедрением методов искусственного интеллекта. В частности, в [8] обосновывается эффективность применения нейронных сетей глубокого обучения для решения задач прогнозирования режимных параметров и идентификации состояний энергосистемы.

Согласно ГОСТ, цифровой двойник – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [4]. Цифровой двойник получает через информационную связь данные об изделии: рабочие параметры, текущее состояние, условия эксплуатации, режим работы оборудования и историю операций. Анализируя эту информацию, ЦД формирует рекомендации по обслуживанию, выявляет уязвимости и потенциальные риски, что способствует снижению аварийности и отказов. По каналу обратной связи от ЦД передаются управляющие команды на моделируемый объект.

В коллективе, который представляют авторы, предложена модель ЦД [9]. Авторами выполнена ее модификация с учетом предложенного онтологического подхода к построению ЦД. Для отладки ЦД, в отсутствие постоянного канала связи с энергетическим объектом, предложено построение виртуальной среды, сформулированы принципы ее построения. При нахождении оптимального места размещения и проектировании ВЭС предлагается использовать визуализацию. Для прогнозирования погодных характеристик ВЭС используется машинное обучение. Таким образом, в качестве основных методов разработки ЦД предлагается использовать, с учетом предложенных моделей, рассмотренные ниже методы онтологического инжиниринга, машинного обучения, построения виртуальной среды и визуализации.

Модель цифрового двойника. Авторами в работе [9] предложена и описана формализованная модель цифрового двойника (*DT*):

$$DT = (IM, MM, DB, VT, SE, RC), \quad (1)$$

где *IM* – информационные модели; *MM* – математические модели; *DB* – базы данных; *VT* – средства визуализации, *SE* – необходимые сервисные компоненты; *RC* – средства связи между компонентами в режиме реального времени.

В связи с развитием онтологического подхода авторами предложена модификация базовой модели, дополненная онтологическими моделями и отношениями между ними. Это

позволяет построить единое онтологическое пространство, обеспечивающее мета-описание и согласованность рассматриваемых компонентов. Модифицированная модель имеет вид:

$$DT = (IM, MM, DB, VT, SE, RC, OM, ROM, ROMIM, ROMMM), \quad (2)$$

где OM – множество онтологических моделей; $ROM \subset OM_i \times OM_k$ – множество отношений между онтологическими моделями, определяет архитектуру построения онтологических моделей, где $\forall i \forall k OM_i \neq OM_k$; $ROMIM \subset OM \times IM$ – множество отношений между онтологическими моделями и информационными моделями, определяет связи онтологических моделей с информационными, давая мета-описание информационных моделей с использованием онтологических; $ROMMM \subset OM \times MM$ – множество отношений между онтологическими моделями и математическими моделями, определяет связи онтологических моделей с математическими, давая мета-описание математических моделей с использованием онтологических.

Для структурирования и формализации знаний в работе используются онтологии, которые необходимо корректно связывать между собой (ROM), чтобы они поддерживали разработку DT , а не замедляли её, для перехода от разрозненных онтологий к общему онтологическому пространству исследований. Для решения этой задачи используется фрактальный подход к структурированию знаний, который был предложен и развит в работах Л. В. Массель [10, 11].

Основой подхода является построение фрактальной стратифицированной модели (ФС-модели) информационного пространства, которую графически можно представить в виде совокупности вложенных сферических оболочек (слоев), каждый из которых объединяет множество однотипных информационных объектов, и, в свою очередь, может быть расслоен. Поскольку рассматриваемая предметная область – один из фрагментов информационного пространства, его можно представить в виде вырезки (например, конуса), в котором выделены рассматриваемые слои. Фрактальный подход предусматривает возможность отображения любого слоя в каждый, но в примерах приводятся не все отображения.

Отображения поддерживаются формализованной моделью DT , которая определяет связи между описываемыми моделями (рис. 1). С использованием ФС-модели, введенные выше отношения могут быть реализованы отображениями слоев ФС-модели, представленными как:

$$D = \{D_o, D_i, D_m\} \quad (3)$$

где D_o – слой знаний об онтологических моделях, D_i – слой знаний об информационных моделях, D_m – слой знаний о математических моделях.

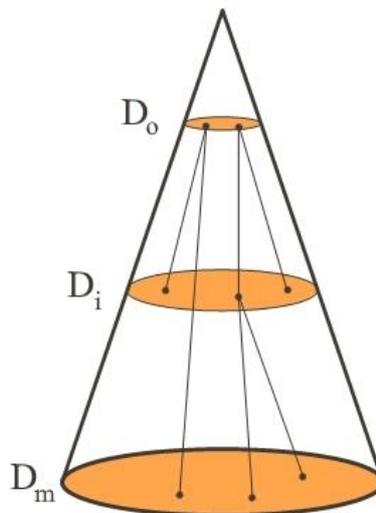


Рис. 1. Слои ФС-модели

Согласно концепции ФС-модели, можно построить отображения из любого слоя в каждый (рис. 1): $F_i^o: D_o \rightarrow D_i$ – отображение из слоя онтологических моделей в слой информационных моделей SDT , $F_m^i: D_i \rightarrow D_m$ – отображение из слоя информационных моделей в слой математических моделей, $F_m^o: D_o \rightarrow D_m$ – отображение из слоя онтологических моделей в слой математических моделей.

Слои реализуются с использованием моделей представления знаний (баз знаний), а отображения поддерживаются инструментальными средствами, обеспечивающими переход от одной модели представления знаний к другой.

Далее авторами предлагается формализованная модель умного цифрового двойника (SDT), путем добавления в модифицированную модель DT интеллектуальных технологий:

$$SDT = (IM, MM, DB, VT, SE, RC, ROM, ROMIM, ROMMM, KB, VS, AIM, SD), \quad (4)$$

где KB – базы знаний, VS – виртуальная среда, AIM – модели искусственного интеллекта, SD – схемы и диаграммы.

В контексте разработки SDT возобновляемых источников энергии, интеграция баз знаний является предпосылкой, обеспечивающей SDT способность к интеллектуальному анализу и принятию решений. Базы знаний выступают в качестве структурированного хранилища, содержащего не только фактические данные об объекте, но и экспертные правила, семантические связи, а также формализованные знания о предметной области. Их ключевая роль заключается в обеспечении SDT возможностью интерпретировать данные, выявлять закономерности и генерировать выводы, что значительно расширяет его функциональность по сравнению с традиционными подходами. Подробное описание виртуальной среды приводится в разделе ниже.

В свою очередь, также предлагается описание моделей искусственного интеллекта и потенциального взаимодействия этих моделей с SDT при помощи ФС-модели. Слои моделей искусственного интеллекта для SDT могут быть представлены, как:

$$AIM = (SM, ES, ML), \quad (4)$$

где AIM – модели искусственного интеллекта, SM – семантические модели, ES – экспертные системы, ML – модели машинного обучения.

Таким образом, для интеграции интеллектуальных технологий в SDT выделены три слоя: слой моделей машинного обучения, слой моделей представления знаний в экспертных системах и слой семантических моделей. Необходимая часть (сектор информационного пространства) для SDT представляется конусом, в котором выделены эти слои (рис. 2), и описывается отображение слоев, где D_{ES} – слой экспертных системами, D_{SM} – слой семантических моделей, D_{ML} – слой моделей машинного обучения.

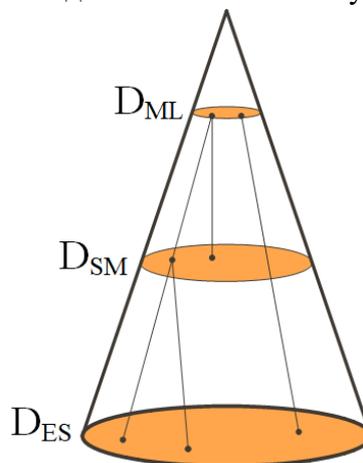


Рис. 2. Фрактальная стратифицированная модель интеллектуальных технологий в составе умного цифрового двойника

Согласно концепции ФС – модели, можно построить отображения (рис. 2):

$F_{SM}^{ML}: D_{ML} \rightarrow D_{SM}$ – отображение из слоя моделей машинного обучения в слой семантических моделей,

$F_{ES}^{ML}: D_{ML} \rightarrow D_{ES}$ – отображение из слоя моделей машинного обучения в слой экспертных систем,

$F_{ES}^{SM}: D_{SM} \rightarrow D_{ES}$ – отображение из слоя семантических моделей в слой экспертных систем.

Методика онтологического инжиниринга для построения ЦД. В статье «онтология» понимается, согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 21838-1-2021 «Информационные технологии. Онтологии высшего уровня» – как совокупность терминов, выражений отношения и связанных с ними определений на естественном языке вместе с одной или несколькими формальными теориями, предназначенными для отражения заданных интерпретаций этих определений [12]. Основу онтологического инжиниринга составляет четырехшаговый алгоритм [13], описанный ниже:

Шаг 1. Цели, стратегия и идентификация границ – определение цели онтологии и потребностей в приобретении знаний в предметной области. Далее необходимо определить область действия или «границы» онтологии и тип онтологии, прежде чем перейти к шагу 2.

Шаг 2. Разработка глоссария или определение мета-концепции – необходимо собрать всю информацию, относящуюся к описываемой области. Основная цель этого шага – отбор и вербализация всех основных объектов и понятий в области.

Шаг 3. Распределение по категориям, включая классификацию и спецификацию. Целью этапа является определение всех основных объектов и концепций предметной области (основных уровней абстракции). Выявление структурированной иерархии является одной из основных целей на данном этапе.

Шаг 4. Уточнение – последний шаг посвящен обновлению визуальной структуры путем исключения любых излишеств, синонимии и противоречий. Главная цель данного шага – создать правильную (“красивую”) онтологию.

Для выполнения онтологического инжиниринга области построения цифрового двойника предложено использовать его, применяя авторскую методику онтологического инжиниринга для проектирования цифровых двойников [14], включающую следующие этапы:

1. Построение системы онтологий области исследования рассматриваемого объекта и интеграция её в пространство знаний онтологий, которые описывают те объекты, в которые входит исследуемый объект и которые могут на него влиять. На этом этапе формализуются знания в области исследования и определяются ограничения, а также иерархия (система) онтологий.
2. Сбор всей необходимой информации об исследуемом объекте, отбор и вербализация основных объектов и понятий. В результате этого этапа будут построены онтологии, детально описывающие исследуемый объект.
3. Уточнение и формализация онтологий, поиск противоречий, синонимов. В результате получается формализованное онтологическое пространство, которое в дальнейшем используется для построения информационных и математических моделей и проектирования архитектуры ЦД.

Онтологии предлагается классифицировать на четыре взаимосвязанные группы онтологий, каждая из которых описывает определенную сторону объекта. На рисунке 3 представлены группы онтологий, которые необходимо построить, и связи между ними. «Онтология моделируемого объекта» описывает компоненты и связи между ними, необходимые для описания моделируемого объекта. «Онтология сопутствующих объектов»

описывает параметры системы, которые не входят в онтологию моделируемого объекта, в рамках ветровой и солнечной электростанции. Такая онтология описывает, например, погодные условия, которые влияют на моделируемые системы. При отсутствии сопутствующих объектов эта онтология не строится.

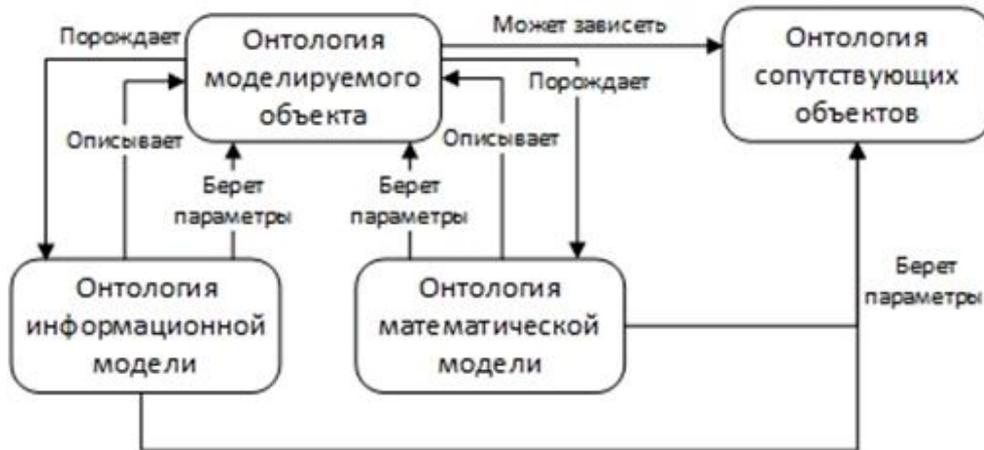


Рис. 3. Основные типы онтологий (метаонтология) ЦД и отношения между ними

Пример онтологии ветровой электростанции, которая является моделируемым объектом, представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Онтология моделируемого объекта (ВЭС)

Построение информационных и математических моделей с использованием онтологий. «Онтология информационной модели» описывает разработанную информационную модель какой-либо части моделируемого объекта и ссылается на концепты из онтологий моделируемого объекта и сопутствующих объектов для описания тех или иных параметров, используемых в информационной модели. «Онтология информационной модели» может быть, как одна, так и множество, в зависимости от потребностей моделирования. На рисунке 5 представлен пример онтологии информационной модели ВЭС. Каждый из концептов, представленных на рисунке 5, кроме концептов «owl: Thing» и «Онтология информационной модели», описывает свою таблицу в реляционной базе данных. Каждый концепт, описывающий таблицу, хранит в себе концепты, отвечающие за атрибуты в этой таблице.



Рис. 5. Онтология информационной модели (ВЭС)

«Онтология математической модели» описывает разработанную математическую модель какой-либо части моделируемого объекта и ссылается на концепты из онтологий моделируемого объекта и сопутствующих объектов для описания тех или иных параметров, используемых в математической модели. «Онтология математической модели» может быть, как одна, так и множество, в зависимости от потребностей моделирования. На рисунке 6 представлен пример онтологии математической модели ВЭС.

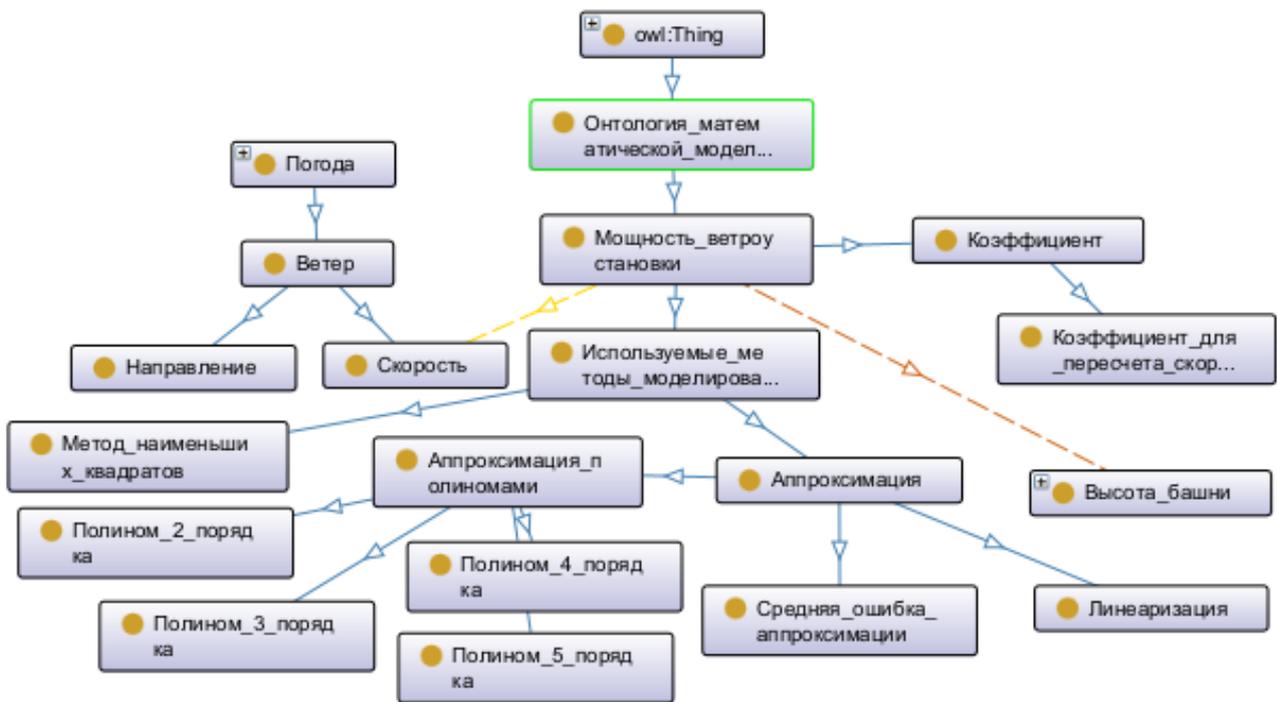


Рис. 6. Связь онтологии математической модели с онтологией моделируемого объекта (ВЭС)

Построение виртуальной среды. Взаимодействие цифрового двойника (ЦД) с реальным объектом предполагает отладку ЦД до его ввода в эксплуатацию (рис. 7).

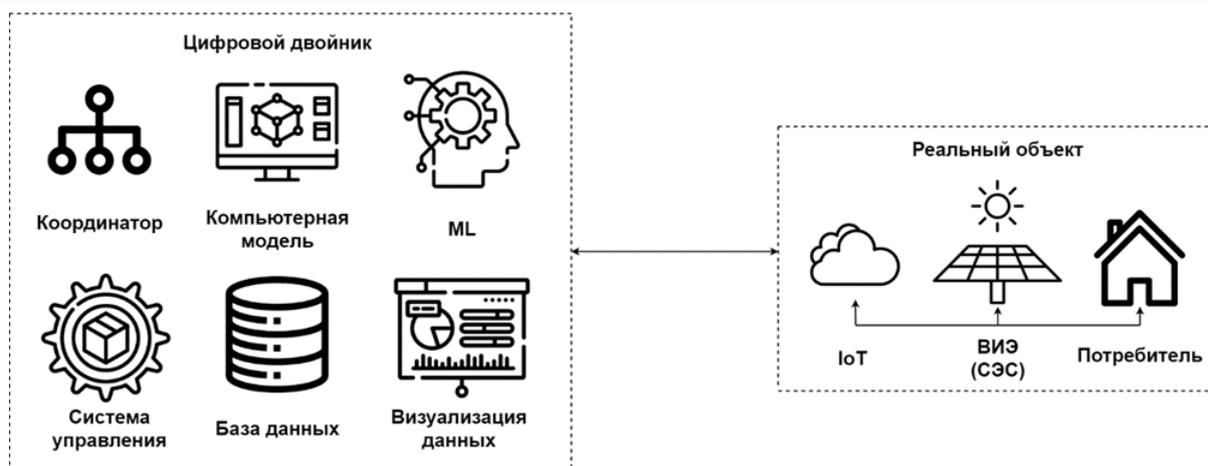


Рис. 7. Взаимодействие цифрового двойника с реальным объектом

Предлагается использовать определение виртуальной среды согласно ГОСТ Р 57721-2017 «Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Эксперимент виртуальный» [15].

Виртуальная среда – искусственная среда, созданная с использованием эмуляции и виртуализации, предназначенная для моделирования объектов и процессов реального мира. Реализация виртуальной среды происходит с помощью программного обеспечения, которое управляет визуализацией и интерактивностью.

Цифровой двойник может работать с виртуальной средой, получая симулированные физические данные из него. Симуляция поведения позволяет проводить сценарное моделирование и анализ данных (рис. 8).

Авторами выделены основные принципы построения виртуальной среды для умного цифрового двойника:

1. Построение онтологии для определения характеристик объекта.
2. Определение внешних характеристик объекта.
3. Эмуляция данных для цифрового двойника.

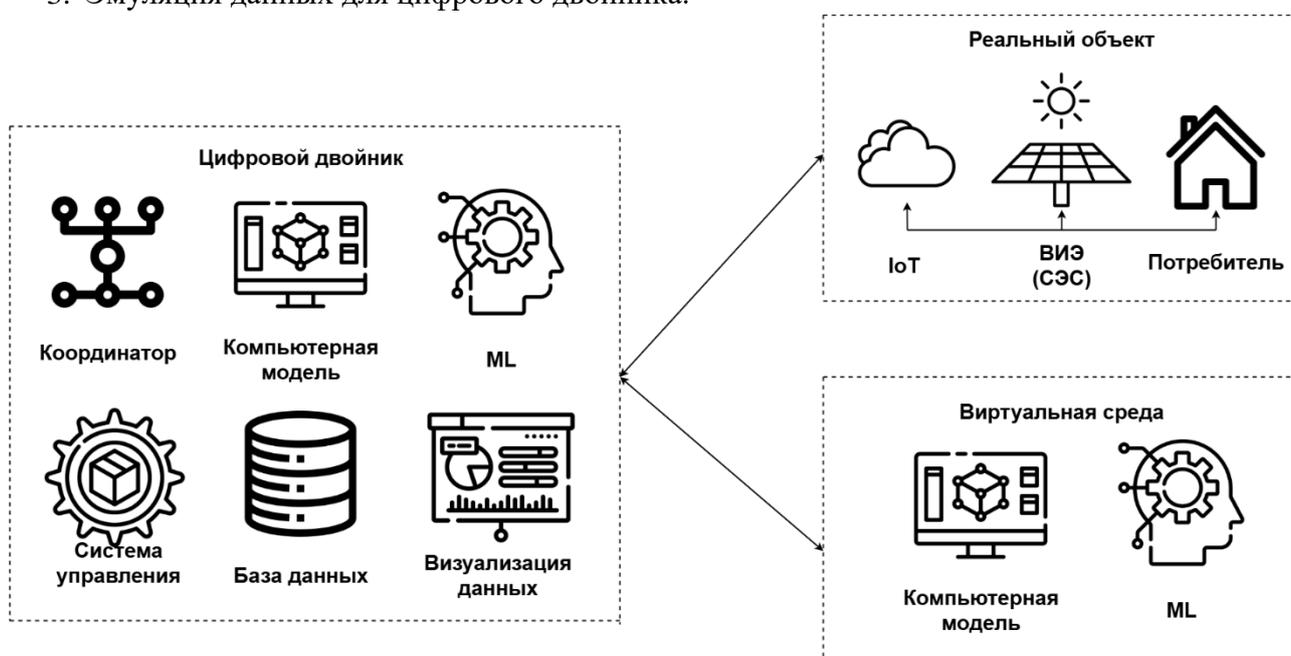


Рис. 8. Взаимодействие цифрового двойника с реальным объектом и виртуальной средой

Для работы цифрового двойника необходимы наличие входных и выходных параметров, а также информация о взаимосвязи между всеми параметрами. Для формирования

необходимых параметров при разработке виртуальной среды предлагается использовать онтологический инжиниринг, который позволяет структурировать и систематизировать данные, обеспечивая четкое понимание и представление взаимосвязей между различными аспектами модели.

Внутренние параметры представляют собой совокупность объектов и процессов, выполняющих действия внутри системы. Они описывают состояние и поведение самого объекта, а также зависят от его внутренней структуры и характеристик. Благодаря тому, что природа внутренних параметров обычно связана с физическими законами и механизмами, их можно моделировать с использованием математических методов.

Внешние параметры представляют собой условия окружающей среды, в которых находится и функционирует объект. Они описывают факторы, которые влияют на поведение объекта, но не зависят от его внутренних процессов. В отличие от внутренних параметров, внешние параметры часто носят случайный характер, что делает их моделирование более сложным.

Машинное обучение. Для эмуляции данных предлагается использовать методы машинного обучения. Эти методы способны эффективно обрабатывать и анализировать большие объемы данных, что позволяет создавать модели поведения системы. Однако для применения машинного обучения требуется наличие качественных и актуальных данных, которые будут служить основой для функционирования виртуальной среды. Эти данные могут включать историческую информацию, характеристики входных и выходных параметров, а также данные о взаимодействиях между различными элементами системы.

Важно отметить, что эффективность машинного обучения во многом зависит от качества и разнообразия используемых данных. Поэтому необходимо обеспечить предварительную обработку, очистку и агрегирование данных, чтобы они были готовы к использованию для обучения моделей. Подходящее качество данных способствует созданию точных моделей, что, в свою очередь, улучшает общую производительность цифрового двойника и его способность к адаптации в условиях динамических изменений.

Для интеграции методов машинного обучения в виртуальную среду предлагается использовать модифицированный авторами (Цыбиков А.Р.) метод на основе CRISP-DM [16] для обоснования выбора модели. Этот метод состоит из нескольких этапов:

1. Определение задач и требований к данным, которые решаются и используются в виртуальной среде при помощи методов машинного обучения, формулирование требований к оценкам качества моделей, а также определение их приоритета в зависимости от задачи, количества и качества данных.
2. Анализ данных предполагает оценку качества данных, исследование временных зависимостей и сезонности данных. Для выполнения оценки данных предлагается использовать разведочный анализ данных. Разведочный анализ данных – это процесс исследования и анализа данных с целью выявления закономерностей, паттернов, аномалий и взаимосвязей между переменными. EDA (Exploratory Data Analysis, Разведочный анализ данных) включает в себя использование различных методов и инструментов для описательной статистики, визуализации данных и построения графиков, а также применения статистических тестов и моделей для проверки гипотез и извлечения информации из набора данных.
3. Подготовка данных включает проведение основных операций над данными перед их использованием: очистка, преобразование, агрегирование, выставление признаков, нормализация и т.д. Эти шаги выполняются при необходимости.
4. Оптимизация гиперпараметров используется для выбора оптимальных гиперпараметров для обучающего алгоритма. Целевая функция, которую требуется минимизировать – это

функция потерь. Выбор функции потерь зависит от задачи, данных и метода, которые используются.

5. Обучение модели. На этом этапе выполняется непосредственное обучение выбранных на предыдущем шаге алгоритмов на подготовленных данных. Ключевой задачей является предотвращение явления «переобучения» (overfitting), при котором модель хорошо описывает обучающие данные, но плохо работает на новых, незнакомых данных. Для этого применяются: регуляризация, метод ранней остановки (EarlyStopping) и перекрестная проверка (cross-validation).
6. Оценка решения на основе метрик. После обучения проводится всесторонняя оценка качества модели на тестовой выборке, которая не участвовала в процессе обучения и настройки. Оценка выполняется на основе метрик, выбор и приоритет которых был обоснован на этапе 1.
7. Интеграция выбранной модели в виртуальную среду. После успешного прохождения оценки лучшая модель переходит на этап эксплуатации. Её интеграция в виртуальную среду предполагает: разработку программного интерфейса (API), создание конвейера (pipeline) и организацию постоянного мониторинга (MLOps).

На рисунке 9 изображен пример работы метода машинного обучения (LSTM) для прогнозирования инсоляции для виртуальной среды цифрового двойника. Модель, состоящая из трех слоев по 128 нейронов, обучалась в течение 12 эпох, общее время обучения составило 17700 секунд. Для предотвращения переобучения использовался метод ранней остановки (EarlyStopping) с мониторингом точности на протяжении 3 эпох (12). График демонстрирует сравнение фактических и прогнозируемых значений суммарной солнечной радиации, где синим цветом обозначены обучающие данные, красным – тестовые, зеленым – фактические значения и фиолетовым – значения прогноза модели.

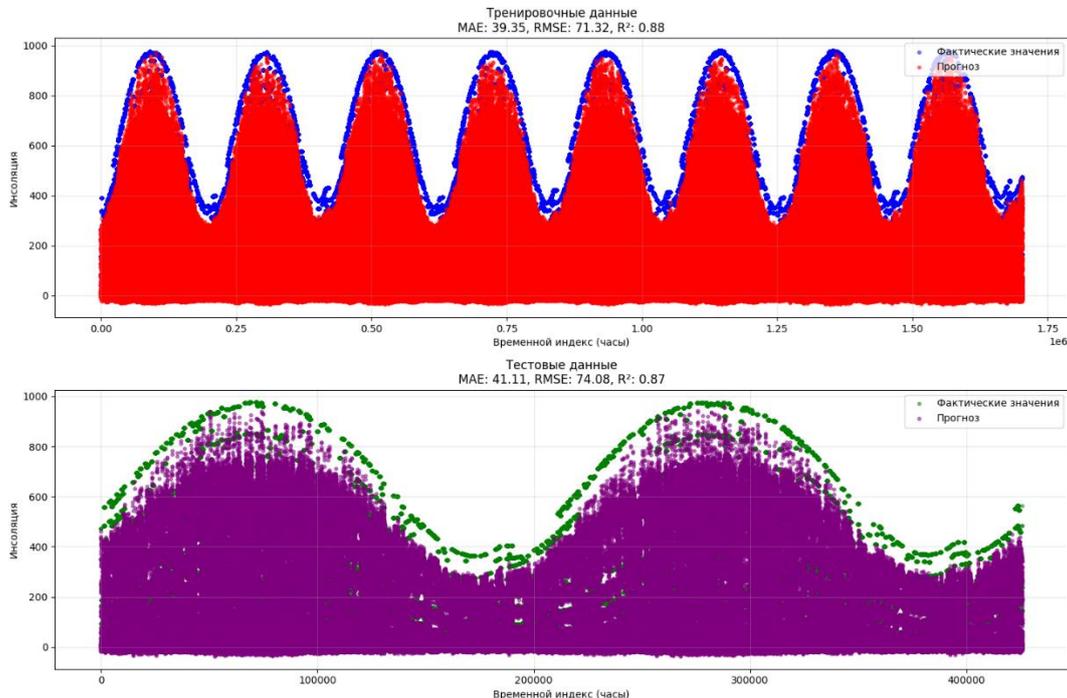


Рис. 9. Результат работы LSTM – сети

Визуализация в программном компоненте нахождения оптимального места размещения ветровой электростанции (ВЭС) и проектирования ВЭС. Программный компонент реализует авторский метод (Щукин Н.И.) обоснования размещения ветровой электростанции. Для определения оптимального места размещения ВЭУ на заданной территории применяется метод роя частиц. Основные этапы алгоритма (рис. 10):

1. Выбор жилого пункта, который необходимо обеспечить электроэнергией.
2. Выбор ветровой установки и её математической модели развиваемой мощности.
3. Задание параметров расчета: количество лет, за которые будут собираться данные о скорости ветрового потока для расчета коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) и количество отображаемых лучших найденных мест размещения: $КИУМ = \frac{P_{ср за год}}{P_{уст}} \cdot 100\%$
4. Задание области расчета (в виде круга).

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2,$$
 где x_0, y_0 – долгота и широта центра круга соответственно
5. Инициализация каждой частицы в рое начальными значениями.
 x_i = случайной точке из области расчета, где x_i – положение частицы,
 $p_i = x_i$, где p_i – лучшее положение частицы,
 $f(p_i) > f(g) \rightarrow g = p_i$, где g – лучшее положение роя, $f(x)$ – КИУМ в точке
6. v_i = случайной точке из области расчета, где v_i – скорость частицы. Расчет новых положений частиц:

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + \phi_p U(0, 1)(p_i - x_i^t) + \phi_g U(0, 1)(g - x_i^t),$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}$$
7. Сбор ретроспективных данных о скорости ветрового потока за определенный период времени в текущем положении частицы.
8. Проведение статистического анализа собранных данных для получения расчетных значений и пересчет скорости ветрового потока на высоту ветровой установки.

$$V(h) = V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha, h_0 \neq 0$$
9. Расчет КИУМ и если:
 $f(x_i^{t+1}) > f(p_i) \rightarrow p_i = x_i^{t+1}$
 $f(p_i) > f(g) \rightarrow g = p_i$
10. То повторение пунктов 6-9 вплоть до окончания итераций алгоритма.
11. Определение количества домо-хозяйств (K) в жилом пункте и потребляемой каждым мощности (P_N)



Рис. 10. Алгоритм метода для обоснования размещения ветровой электростанции

12. Расчет общей необходимой потребляемой мощности в выбранном жилом пункте.

$$P = P_N * K.$$

13. Определение, по данным о погодных характеристиках, соотношения мощности, вырабатываемой ветровыми установками и солнечными панелями (P_S), и необходимости резервного дизель-генератора.

14. Определение количества необходимых ветровых установок (W).

$$W = \frac{P - P_S}{P_W},$$

где P_W – вырабатываемая мощность ветровой установки в найденных точках.

Для начала расчета с использованием предлагаемого программного компонента, включающего визуализацию (Щукин Н.И.) необходимо ввести начальные данные расчета (рис. 11): «Количество точек расчета» – количество лучших рассчитанных точек, которые увидит пользователь в конце расчета; «Модель для расчета» – модель, используемая для расчета в каждой точке.

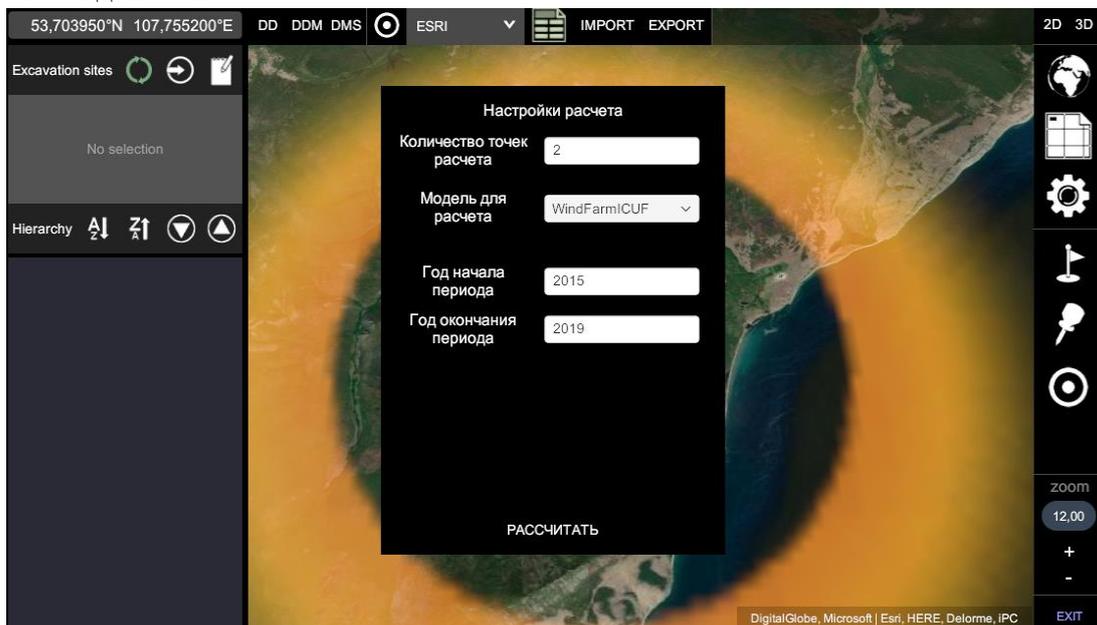


Рис. 11. Всплывающее окно с настройками расчета

Основой визуализации результатов применения предложенного метода является интерактивная модель планеты Земля, реализуемая с использованием 3D-графики (рис. 12).

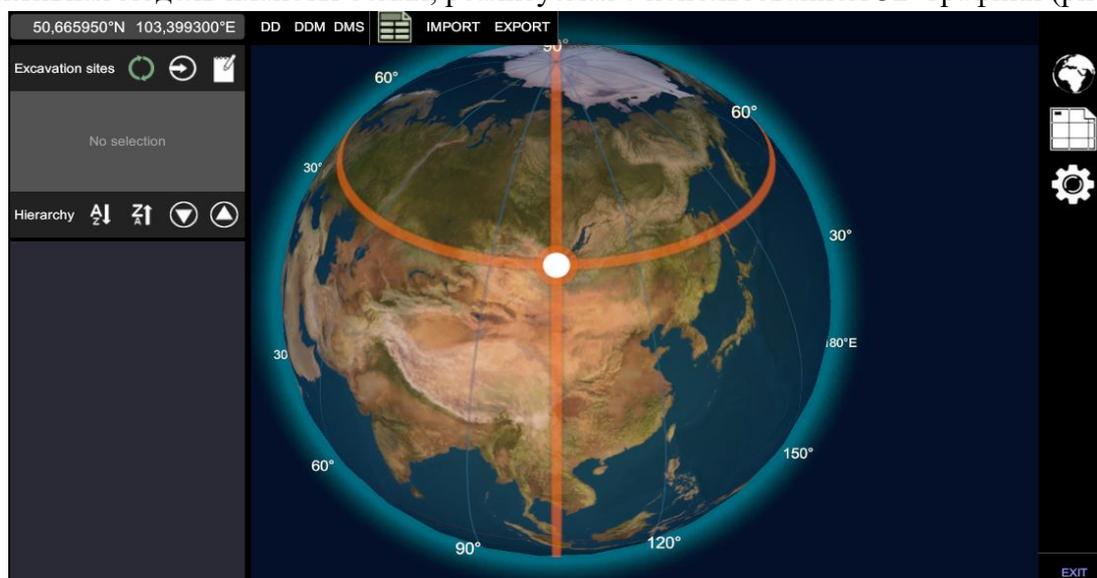


Рис. 12. Интерфейс с моделью Земли

При приближении к поверхности пользователю открывается возможность увидеть визуализацию местности, полученную через интеграцию с сервисами ESRI [17]. Снимки со спутников обеспечивают высокую степень детализации, включая топографические особенности и существующую инфраструктуру.

Процесс нахождения оптимального места размещения ВЭС начинается с установки точки для расчета в интерфейсе визуализации. Она служит отправной точкой для дальнейшего анализа условий ветра в данной местности. Важным шагом является загрузка данных о ветровых условиях по широте и долготе, которые извлекаются с помощью NASA POWER Hourly API [18]. Этот API обеспечивает доступ к актуальным и историческим метеорологическим данным, включая скорость и направление ветра, что критично для оценки потенциала ВЭС в разных местах. Возможно загружать сведения о погоде, как в реальном времени, так и выбирать определенный промежуток, что позволяет пользователю наблюдать за конкретной территорией, на которой он собирается анализировать возможность установки ВЭУ.

«Год начала периода» и «Год окончания периода» означают, в каких промежутках происходит сбор погодных характеристик. По результатам расчета появляются точки с лучшими параметрами, это демонстрирует рисунок 13.

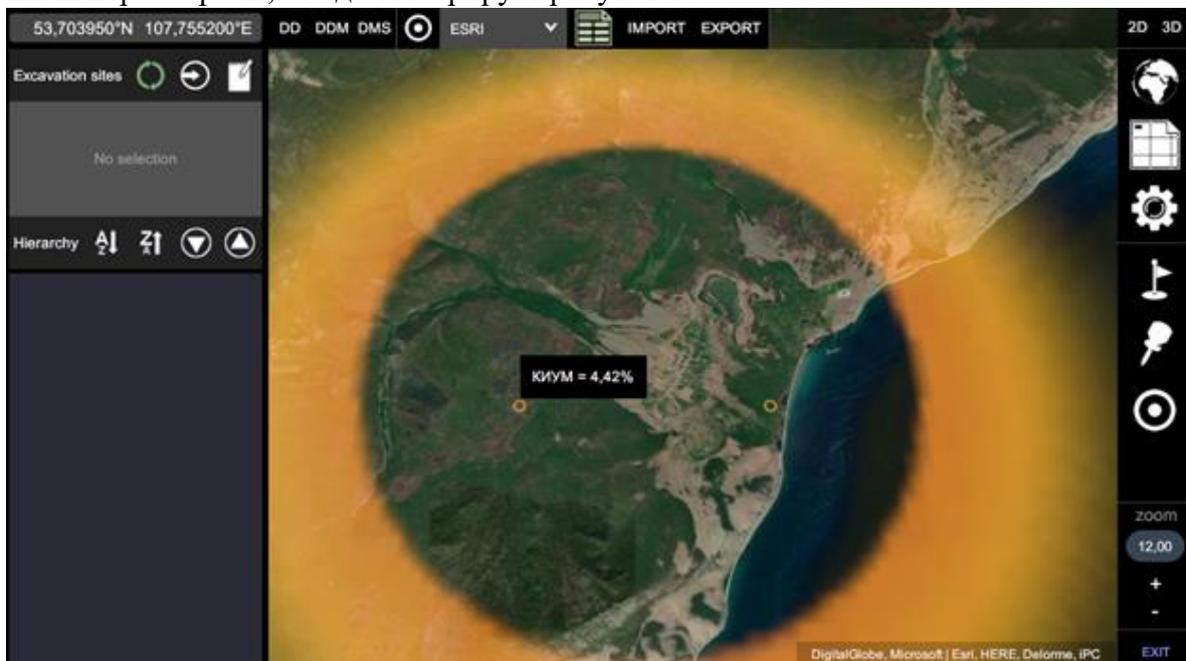


Рис. 13. Визуализация расчета

Пункты алгоритма с 9 по 11 реализуются на сцене проектирования ветровой электростанции (рис. 14). На текущий момент валидация результатов расчета выполняется с помощью экспертных оценок.



Рис. 14. Проектирование ветровой электростанции

Заключение. В статье описаны методы построения умных цифровых двойников возобновляемых источников энергии. Развитие существующей формализованной модели цифрового двойника выполняется за счет интеграции онтологических моделей и отношений между ними, а затем – путем введения интеллектуальных компонентов, таких, как базы знаний, виртуальная среда и модели искусственного интеллекта. Важная роль в обеспечении целостности и согласованности разрабатываемой системы отводится онтологическим моделям. Предложенный метод построения информационных и математических моделей с использованием онтологий обеспечивает структурирование знаний о моделируемом объекте, его окружении и связанных с ним моделях.

Важным результатом работы является метод построения и использования виртуальной среды, которая решает критическую задачу отладки и валидации ЦД в условиях отсутствия постоянной связи с реальным физическим объектом. Разработанный модифицированный метод на основе CRISP-DM для интеграции методов машинного обучения формализует создание прогнозных моделей, обеспечивающих эмуляцию стохастических внешних параметров, таких, как погодные условия. Представленный программный компонент нахождения оптимального места размещения ВЭС с визуализацией, интегрирующей интерактивную модель Земли и метеорологические API, демонстрирует прикладную ценность разработанного *SDT* для решения задач стратегического планирования – оптимального размещения и проектирования ВЭС.

Благодарности. Работа выполняется в рамках проекта по госзаказу ИСЭМ СО РАН, № темы FNEU-2026-0007, рег. № АААА-А26-121012090007-7.

Список источников

1. Grieves M.W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC, 2014, 7 p.
2. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies. IEEE MultiMedia, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 87–92, DOI: 10.1109/MMUL.2018.023121167.
3. Прохоров А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, А. Лысачев А. Научный редактор проф. Боровков А.И. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с
4. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – Введ. 2022-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928> (дата обращения: 20.11.2025).
5. Непша Ф.С. Онтология как основа для создания цифровых двойников объектов управления интеллектуальной распределенной энергетики / Ф.С. Непша, А.А. Андриевский, М.И. Красильников // Автоматизация в промышленности, 2021. – № 1. – С. 27-33. – DOI: 10.25728/avtprom.2021.01.04. – EDN ALJNLE.
6. Андриюшкевич С. К. Разработка цифрового двойника энергетической системы на основе онтологической модели / С.К. Андриюшкевич, С.П. Ковалев, Е.И. Нефедов // Автоматизация в промышленности, 2020. – № 1. – С. 51-56. – DOI: 10.25728/avtprom.2020.01.10. – EDN OHGENW.
7. Ковалев С.П. Проектирование информационного обеспечения цифровых двойников энергетических систем / С.П. Ковалев // Системы и средства информатики, 2020. – Т. 30. – № 1. – С. 66-81. – DOI: 10.14357/08696527200106. – EDN UNOOKU.
8. Ковалев С.П. Применение нейронных сетей глубокого обучения в математическом обеспечении цифровых двойников электроэнергетических систем / С.П. Ковалев // Системы и средства информатики, 2021. – Т. 31. – № 1. – С. 133-144. – DOI: 10.14357/08696527210111. – EDN NQPUXR.
9. Массель Л.В. Семантическое моделирование при построении цифровых двойников энергетических объектов и систем / Л.В. Массель, А.Г. Массель // Онтология Проектирования, 2023. – Т. 13. – № 1 (47). – С. 44-54.
10. Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения / Л.В. Массель // Онтология проектирования, 2016. – Т. 6. – № 2. – С. 149-161.
11. Массель Л.В. Фрактальный подход к построению информационных технологий // Информационная технология исследований развития энергетики / ред. Криворуцкий Л.Д., Массель Л.В. – Новосибирск: Наука, Изд. фирма РАН, 1995. – С. 40-67.
12. ГОСТ Р ИСО/МЭК 21838-1-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Онтологии высшего уровня (TLO). Часть 1. Требования. – Введ. 2022-04-30. – URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/gost-r_gosudarstvennyj-standart/9/gost_r_iso_mek_21838-1-2021_natsionalnyy_standart_rossiyskoy.html#Par470 (дата обращения: 20.11.2025).

13. Gavrilova T., Laird D. Practical Design of Business Enterprise Ontologies. In: M. Bramer, V. Terziyan (eds.). Industrial Applications of Semantic Web. Boston, MA, Springer US, 2005, pp. 65-81.
14. Массель Л.В. Построение цифровых двойников ветровой и солнечной электростанций на основе онтологического подхода / Л.В. Массель, А.Г. Массель, Н.И. Щукин, и др. // Автоматизация в промышленности, 2022. – № 7. – С. 28-32.
15. ГОСТ Р 57721-2017. Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Эксперимент виртуальный. Общие положения. – Введ. 2017-01-01.
16. Chapman P., Clinton J., Kerber R. et al. CRISP-DM 1.0 – Step-by-step data mining guide. 2000, 76 p.
17. ArcGIS REST. Available at: <https://services.arcgisonline.com/arcgis/rest/services> (accessed: 06/14/2025).
18. NASA POWER Hourly API. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/api/pages/> (accessed: 06/14/2025).

Массель Людмила Васильевна. Доктор технических наук, профессор, зав. отделом Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Scopus AuthorID: 56440157300, AuthorID: 8466, SPIN: 3757-0830, ORCID: 0000-0002-9088-9012, massel@isem.irk.ru. Россия, Иркутск, Лермонтова д.130.

Цыбиков Алексей Ринчинович. Младший научный сотрудник отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. AuthorID: 1148961, SPIN: 3424-3032, ORCID: 0000-0002-0434-8480, tsibikow@mail.ru. Россия, Иркутск, Лермонтова д.130.

Щукин Никита Игоревич. Младший научный сотрудник отдела Трубопроводных систем энергетики, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. AuthorID: 112253, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X, niksha14@mail.ru. Россия, Иркутск, Лермонтова д.130.

УДК 004.8:620.9

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.003

Methods for building Smart Digital Twins of renewable energy

Liudmila V. Massel, Aleksey R. Tsybikov, Nikita I. Shchukin

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Russia, Irkutsk, tsibikow@mail.ru

Abstract. In the context of the global transition to a low-carbon economy, the design of renewable energy facilities such as solar and wind power plants require consideration of numerous hard-to-predict factors: variability of natural resources, terrain topography, environmental constraints, and economic parameters. Digital twins (DTs) represent a powerful tool for addressing these challenges by providing a virtual representation of a physical asset throughout its entire lifecycle. This article examines proposed methods for constructing Smart Digital Twins, (SDTs) for use in renewable energy facility design. The foundation of the proposed approach is a modified digital twin model based on ontological models. These models formalize key concepts, entities, their attributes within the renewable energy domain, as well as the semantic relationships among them. The ontology provides a unified glossary and data structure, which is critical for integrating heterogeneous information sources and ensuring mutual understanding among system components and specialists. The next step involves transforming this ontology into a smart digital twin model by incorporating intelligent components such as knowledge bases, a virtual environment, artificial intelligence models, schemas, and diagrams. To describe the relationships between models and components, a fractal stratified model is proposed. This model formalizes the knowledge structure and interconnections among ontological, informational, and mathematical models. The article details an adapted ontological engineering methodology tailored for digital twin design tasks, along with a method for constructing a virtual environment that enables debugging of both digital twins and smart digital twins in conditions of intermittent or entirely absent connectivity to the physical asset. To emulate external parameters such as weather conditions, a modified process based on CRISP-DM (Cross-Industry Standard Process for Data Mining) is proposed, facilitating the integration of machine learning models. The practical relevance of the approach is demonstrated through the development of a visualization component for identifying optimal power plant locations and supporting their design. This tool leverages an interactive 3D model of the Earth, satellite data, and meteorological APIs. The implemented solution confirms the feasibility of applying smart digital twins to renewable energy facility design.

Keywords: digital twin, smart digital twin, renewable energy, fractal-stratified model, ontology, machine learning, visualization

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project FNEU-2026-0007 of the Fundamental Research Program of Russian Federation, registration number AAAA-A26-121012090007-7.

References

1. Grieves M.W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC, 2014, 7 p.

2. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies. IEEE MultiMedia, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 87–92, DOI: 10.1109/MMUL.2018.023121167.
3. Prokhorov A., Lysachev A. Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoy opyt [Digital Twin. Analysis, Trends, World Experience]. Ed. by A.I. Borovkov. Moscow, AlliancePrint Publ., 2020, 401 p.
4. GOST R 57700.37-2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions. Introduced 2022-01-01. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928> (accessed: 11.20.2025).
5. Nepsha F.S., Andrievsky A.A., Krasilnikov M.I. Ontologiya kak osnova dlya sozdaniya tsifrovyykh dvoynikov ob"yektov upravleniya intellektual'noy raspredelennoy energetiki [Ontology as a basis for creating digital twins of intelligent distributed energy control objects]. Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation in Industry], 2021, no. 1, pp. 27-33, DOI: 10.25728/avtprom.2021.01.04, EDN: ALJNLE.
6. Andryushkevich S.K., Kovalev S.P., Nefedov E.I. Razrabotka tsifrovogo dvoynika energeticheskoy sistemy na osnove ontologicheskoy modeli [Development of a digital twin of an energy system based on an ontological model]. Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation in Industry], 2020, no. 1, pp. 51-56, DOI: 10.25728/avtprom.2020.01.10, EDN: OHGEHW.
7. Kovalev S.P. Proyektirovaniye informatsionnogo obespecheniya tsifrovyykh dvoynikov energeticheskikh sistem [Designing information support for digital twins of energy systems]. Sistemy i sredstva informatiki [Systems and Means of Informatics], 2020, vol. 30, no. 1, pp. 66-81, DOI: 10.14357/08696527200106, EDN: UNOOKU.
8. Kovalev S.P. Primeneniye neyronnykh setey glubokogo obucheniya v matematicheskom obespechenii tsifrovyykh dvoynikov elektroenergeticheskikh sistem [Application of deep learning neural networks in mathematical support of digital twins of electric power systems]. Sistemy i sredstva informatiki [Systems and Means of Informatics], 2021, vol. 31, no. 1, pp. 133-144, DOI: 10.14357/08696527210111, EDN: NQPUXR.
9. Massel L.V., Massel A.G. Semanticheskoye modelirovaniye pri postroyenii tsifrovyykh dvoynikov energeticheskikh ob"yektov i sistem [Semantic modeling in the construction of digital twins of energy objects and systems]. Ontologiya proyektirovaniya [Ontology of Designing], 2023, vol. 13, no. 1 (47), pp. 44-54.
10. Massel L.V. Fraktal'nyy podkhod k strukturirovaniyu znaniy i primery yego primeneniya [Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application]. Ontologiya proyektirovaniya [Ontology of Designing], 2016, vol. 6, no. 2, pp. 149-161.
11. Massel L.V. Fraktal'nyy podkhod k postroyeniyu informatsionnykh tekhnologiy [Fractal approach to building information technologies]. In: L.D. Krivorutsky, L.V. Massel (eds.). Informatsionnaya tekhnologiya issledovaniy razvitiya energetiki [Information Technology for Energy Development Research]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995, pp. 40-67.
12. GOST R ISO/IEC 21838-1-2021. National Standard of the Russian Federation. Information technology. Top-level ontologies (TLO). Part 1. Requirements. Introduced 2022-04-30. Available at: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/gost-r_gosudarstvennyj-standart/9/gost_r_iso_mek_21838-1-2021_natsionalnyy_standart_rossiyskoy.html#Par470 (accessed: 11.20.2025).
13. Gavrilova T., Laird D. Practical Design of Business Enterprise Ontologies. In: M. Bramer, V. Terziyan (eds.). Industrial Applications of Semantic Web. Boston, MA, Springer US, 2005, pp. 65-81, DOI: 10.1007/0-387-28597-4_5.
14. Massel L.V., Massel A.G., Shchukin N.I., Tsybikov A.R., Losev A.S. Postroyeniye tsifrovyykh dvoynikov vetrovoy i solnechnoy elektrostantsiy na osnove ontologicheskogo podkhoda [Construction of digital twins of wind and solar power plants based on an ontological approach]. Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation in Industry], 2022, no. 7, pp. 28-32.
15. GOST R 57721-2017. Information and communication technologies in education. Virtual experiment. General provisions. Introduced 2017-01-01.
16. Chapman P., Clinton J., Kerber R. et al. CRISP-DM 1.0 – Step-by-step data mining guide. 2000, 76 p.
17. ArcGIS REST. Available at: <https://services.arcgisonline.com/arcgis/rest/services> (accessed: 06/14/2025).
18. NASA POWER Hourly API. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/api/pages/> (accessed: 06/14/2025).

Massel Liudmila Vasilyevna. D.Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. Scopus AuthorID: 56440157300, AuthorID: 8466, SPIN: 3757-0830, ORCID: 0000-0002-9088-9012, massel@isem.irk.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Tsybikov Aleksey Rinchinovich. Research Fellow of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS AuthorID: 1148961, SPIN: 3424-3032, ORCID: 0000-0002-0434-8480, tsibikow@mail.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Shchukin Nikita Igorevich. Research Fellow of Pipeline Energy Systems, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. AuthorID: 1122536, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X, niksha14@mail.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Статья поступила в редакцию 16.10.2025; одобрена после рецензирования 12.02.2026; принята к публикации 12.02.2026.

The article was submitted 10/16/2025; approved after reviewing 02/12/2026; accepted for publication 02/12/2026.

УДК 004.89

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.004

Интеллектуальная система анализа данных процесса пиролиза биомассы

Бачурин Роман Михайлович, Захарова Ирина Гелиевна

Тюменский государственный университет, Россия, Тюмень, romanbachurin@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты исследования, направленного на разработку и программную реализацию методов математического моделирования процесса пиролиза растительной биомассы. Основная цель работы заключается в создании интеллектуальной системы анализа экспериментальных данных, которая позволяет исследовать технологические параметры процесса пиролиза. Ключевые компоненты разработанной системы включают: комплекс моделей машинного обучения (значения метрик качества моделей $RMSE < 3.9$, $R^2 > 0.8$) для прогнозирования выхода конечных продуктов пиролиза; инструменты анализа кривых дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и оценки теплового эффекта реакций; подсистему идентификации и визуализации термогравиметрических (ТГ) и ДСК кривых. Обучение прогнозных моделей проводилось на выборке (750 записей), составленной из открытых наборов данных о натуральных экспериментах пиролиза растительного сырья. В качестве целевых переменных выступали процентное содержание твердых, жидких и газообразных веществ в конечных продуктах пиролиза. Независимые переменные включали физико-химические характеристики сырья и параметры процесса пиролиза. Практическая значимость исследования определяется возможностью более глубокого понимания процессов разложения биомассы. Разработанная система предоставляет исследователям и технологам комплексные инструменты для анализа и идентификации ДСК кривых, что облегчает интерпретацию экспериментальных данных. Научная новизна работы заключается в создании единой платформы поддержки исследований на основе интеграции методов машинного обучения с традиционными подходами к анализу процесса пиролиза. Это дает возможность существенно повысить точность прогнозирования и оптимизировать процесс пиролиза с точки зрения получения конечных продуктов. Результаты исследования могут найти применение в научных исследованиях в области термохимических процессов, в прикладной биоэнергетике, химической промышленности и других областях, связанных с переработкой биомассы методом пиролиза. Перспективы развития системы связаны с расширением базы данных ДСК кривых, улучшением алгоритмов машинного обучения и интеграцией дополнительных методов анализа экспериментальных данных для детальной интерпретации процесса пиролиза с учетом его динамики.

Ключевые слова: пиролиз биомассы, математическое моделирование, машинное обучение, нейронные сети, дифференциальная сканирующая калориметрия

Цитирование: Бачурин Р.М. Интеллектуальная система анализа данных процесса пиролиза биомассы / Р.М. Бачурин, И.Г. Захарова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 59-67 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.004.

Введение. Интеллектуальные системы анализа данных становятся ключевыми инструментами в современных исследованиях термохимических процессов [1]. В частности, такие программные продукты широко применяются для исследования процесса пиролиза растительного сырья [2]. Пиролиз биомассы – это термическое разложение органических материалов в отсутствие кислорода, приводящее к образованию ценных продуктов: биоугля, бионефти и синтез-газа. Пиролиз растительного сырья является перспективным направлением исследований для устойчивого управления отходами и производства возобновляемой энергии [3]. Эффективность пиролиза зависит от точного контроля параметров процесса, таких, как температурные режимы и тепловые эффекты. Тепловые эффекты процесса отражаются в данных термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [4].

Анализ ДСК кривых позволяет оценить термическое поведение биомассы при различных температурах и условиях, что необходимо для оптимизации процесса пиролиза и получения его целевых продуктов. Термический анализ ДСК является важным инструментом для изучения процесса пиролиза [5]. Этот метод позволяет определить температурные диапазоны, в которых происходят основные стадии разложения биомассы [6]. Кривые ДСК

предоставляют информацию об эндотермических и экзотермических процессах, что помогает понять кинетику реакций пиролиза и оптимизировать условия для получения желаемых конечных продуктов [7]. На основе данных ТГА и масс-спектрометрии возможно определение кинетических коэффициентов для математического моделирования процессов в реакторе, включая как валидацию моделей [8], так и кинетический анализ выхода конечных продуктов пиролиза [9].

Применение интеллектуальных методов анализа данных, включая классические алгоритмы машинного обучения и нейросетевые подходы, открывает новые возможности для решения важной задачи, связанной с анализом данных процесса пиролиза [10], а именно, речь идет о задачах прогнозирования выхода конечных продуктов пиролиза, определения оптимальных условий процесса и интерпретации больших объемов данных, полученных с помощью термического анализа [11]. Для автоматизации анализа экспериментальных данных было бы целесообразно объединить в рамках интеллектуальной системы возможности решения вышеперечисленных задач.

Целью настоящей работы является разработка и программная реализация методов математического моделирования процесса пиролиза растительной биомассы в составе специализированной интеллектуальной системы. Особое внимание уделено решению следующих ключевых задач моделирования: прогнозирование выхода конечных продуктов пиролиза, вычисление энтальпии процесса и идентификация ДСК кривых.

1. Прогнозирование выхода конечных продуктов. Для прогнозирования выхода конечных продуктов пиролиза биомассы с высокой точностью применяются современные методы машинного обучения [12], в первую очередь, ансамблевые методы, такие, как случайный лес [13]. Также находит широкое применение и нейросетевой подход [12-14]. Это позволяет эффективно моделировать процесс выхода продуктов пиролиза. Для решения задачи прогнозирования система предоставляет заранее обученные модели – как классические, так и нейросетевые. В качестве обучающей выборки для построения моделей были использованы данные о выходе конечных продуктов в ходе пиролиза растительного сырья из открытых источников [15-17]. В этом наборе данных представлены значения следующих физико-химических характеристик сырья и параметров процесса пиролиза: влажность (%), зольность (%), выход летучих продуктов (%), фиксированный углерод (%), доля углерода в сырье (%), доля водорода в сырье (%), доля кислорода в сырье (%), доля азота в сырье (%), размер частиц сырья (мм), конечная температура процесса пиролиза (°C), скорость нагревания биомассы (°C / мин), скорость пропускания инертного газа (мл / мин). Целевыми переменными для прогнозирования являются: выход твердых веществ; выход жидких веществ, включая смолу и воду; выход газа в процентном соотношении. Набор данных содержит 750 записей о натуральных экспериментах пиролиза растительного сырья. Для прогнозирования этих значений были обучены регрессионные модели. В качестве метрик качества для оценки моделей использовались среднеквадратическая ошибка (RMSE) и коэффициент детерминации (R^2) [13], значения которых указаны в таблице 1.

Таблица 1. Метрики качества моделей прогнозирования продуктов пиролиза

Модель прогнозирования	Метрики качества модели машинного обучения	
	RMSE	R^2
LightGBM Regressor	3,7253	0,8048
Extra Trees Regressor	3,1809	0,8688
Bagging Regressor	3,7126	0,8239
XGBoost Regressor	3,6829	0,8112
Нейросетевая модель	3,8854	0,8059

Модели LightGBM, Extra Trees Regressor, Bagging Regressor, XGBoost являются ансамблевыми моделями, основанными на деревьях решений. Для ансамблевых моделей, продемонстрировавших наилучшие показатели качества, осуществлялась ручная оптимизация гиперпараметров. В процессе настройки варьировались следующие параметры: глубина решающих деревьев, количество деревьев в ансамбле, а также число признаков, учитываемых при каждом разбиении узла. Нейросетевая модель представляет собой полносвязную искусственную нейронную сеть с 2 скрытыми слоями (36 и 12 нейронов соответственно).

В работе применялся метод *k*-блочной кросс-валидации, при котором исходный набор данных был разделен на 10 равных частей. На каждой итерации одна из этих частей выступала в роли тестовой выборки для оценки качества модели, а оставшиеся 9 частей использовались для её обучения. Такой подход позволяет более объективно оценить обобщающую способность модели и снижает воздействие случайного разбиения данных на полученные результаты. В итоге были вычислены средние показатели качества модели по всем блокам, что обеспечивает надёжную и всестороннюю оценку её прогностической эффективности. Этот метод даёт возможность проверять модель на разных подмножествах данных, уменьшая риск переобучения и недообучения, и является общепринятой практикой при ограниченности данных.

2. Вычисление энтальпии процесса пиролиза. Вычисление значений этой важной характеристики иллюстрируется в интерфейсе системы в соответствии с принятым у исследователей эмпирическим методом. В качестве исходных данных используются ряды экспериментальных значений: время (мин), температура (°C), ДСК (мВт / мг), экспортированных с приборов (в частности, таких как NETZSCH STA 449 F5 [18]) и представленных в виде текстовых файлов.

Данные ДСК подвергаются сглаживанию для подавления высокочастотного шума, препятствующего корректному определению значений производных и точек изменения кривизны. Для этого применяется фильтр Савицкого-Голея [19], позволяющий сохранить форму сигналов при фильтрации. Для получения более глубокой информации о характере тепловых процессов анализ не ограничивается первичной интерпретацией ДСК-кривой. Выполняются дополнительные вычисления. Первая производная ДСК-кривой отражает скорость изменения теплового эффекта. Вторая производная позволяет выявить точки перегиба, критические для локализации начальных и конечных фаз реакций [20]. Алгоритм находит такие точки, используя нули второй производной, дополнительно применяя температурные фильтры для исключения недостоверных точек. На основе найденных точек строятся сегменты между парами, для которых кривая ДСК остаётся выше прямой, соединяющей точки. Такие сегменты трактуются как выпуклые области интереса – их анализ позволяет оценить термодинамическую значимость процессов. Далее осуществляется группировка перекрывающихся сегментов и определение "главных линий" – наибольших по температурному интервалу отрезков, проходящих через важнейшие события.

Для оценки энергетического эффекта каждого процесса выполняется численное интегрирование между кривой ДСК и линией, соединяющей точки главного сегмента. Для это применяется численный метод Симпсона [21] с шагом интегрирования 0.2, обеспечивающий высокую точность оценки площади под кривой:

$$Area = \int_{T_1}^{T_2} (f_{DSC}(T) - f_{line}(T))dT,$$

где T_1 и T_2 – температуры, соответствующие началу и концу рассматриваемого сегмента; $f_{DSC}(T)$ – экспериментальное значение ДСК-сигнала при температуре T ;

$f_{line}(T)$ – ордината прямой, соединяющей точки T_1 и T_2 ;

$Area$ – искомая площадь, значение которой равно тепловому эффекту процесса.

Площадь интерпретируется, как тепловой эффект, сопровождающий этот процесс. Помимо численного значения, строится полигон, описывающий форму области на графике, что позволяет визуализировать эти регионы в виде закрашенных участков.

3. Идентификация ДСК кривых. Под идентификацией кривых здесь понимается поиск наиболее близкой (к данной) ДСК кривой из числа заранее импортированных (эталонных) кривых. В настоящее время в базу данных системы загружены 8 ДСК кривых для различных видов сырья. При идентификации материалов на основе данных термического анализа, в частности, по кривым газовой выделения, используются сигналы масс-спектрометра, представленные в формате QMID(s:1|m:X)/A, где X – значение отношения масса/заряд (m/z) для конкретного иона (например, $m:16$, $m:28$, $m:44$ и др.), по которым определяется значение метрики схожести MSE. Кроме того, система позволяет исследователю визуально оценить особенности кривых для различного сырья (рисунок 1).

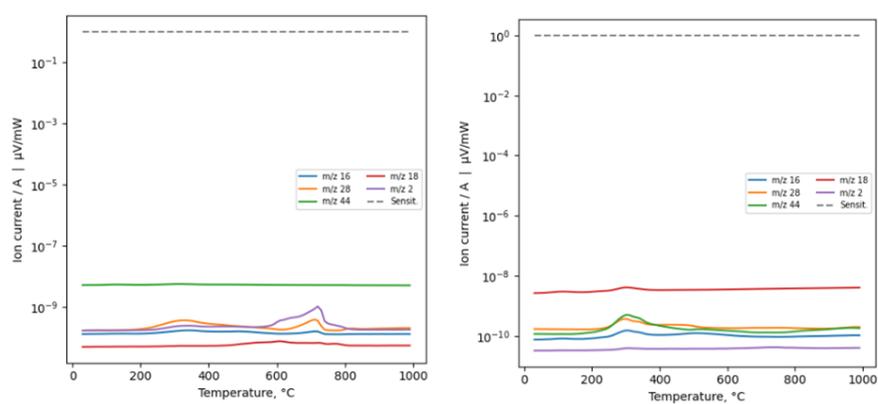


Рис. 1. Интерфейс системы: показания масс-спектрометра для торфа (слева) и отрубей (справа)

Эти сигналы соответствуют фрагментам молекул таких газов, как O_2 , CO , CO_2 , H_2O и др., образующихся при термическом разложении вещества. Соответственно, требуется количественно оценить степень сходства между анализируемым и эталонным образцами. Такая задача в общем случае сводится к сравнению многомерных временных рядов (в настоящей работе – зависимости интенсивности сигнала от температуры) с последующим выбором наилучшего совпадения.

При сравнении новой загруженной кривой, представляющей временные ряды с вышеуказанными признаками масс-спектрометрии, в систему, происходит поиск в базе данных системы наиболее схожей кривой, то есть, имеющей минимальное значение метрики для соответствующих признаков. Для сравнения временных рядов применяются различные метрики для оценки сходства. В этом исследовании была использована среднеквадратичная ошибка (MSE).

Различные виды биомассы, такие, как древесина, сельскохозяйственные отходы и водоросли, имеют различные химические составы и термические характеристики, что влияет на процесс их пиролиза [22]. Исследования термического поведения различных видов биомассы с использованием ТГА и ДСК позволяют определить оптимальные условия для их переработки в энергию и ценные химические вещества.

4. Интерфейс интеллектуальной системы. Система представлена в виде монолитного веб-приложения, серверная часть которого разработана на языке Python с использованием фреймворка Django. Клиентская часть веб-приложения реализована средствами фреймворка React. Интерфейс системы представлен на примере исследования одной из задач – вычисления

энтальпии процесса пиролиза (рисунок 2). График отображения кривой ДСК является интерактивным, позволяя выбирать исследователю отображение различных кривых, точек и сегментов. В таблице точек исследователь имеет возможность удалить точки событий и пересчитать линии и области. Также исследователю предоставлена возможность удалить найденные линии с автоматическим удалением соответствующих этим линиям точек событий, которые являются началом и концом. Элементы управления для пересчета линий, экспорта точек событий и областей с вычисленной энтальпией представлены с помощью button. Изменять коэффициент сглаживания исследователь может путём его числового изменения в соответствующем элементе управления, представленным компонентом типа «Textbox».

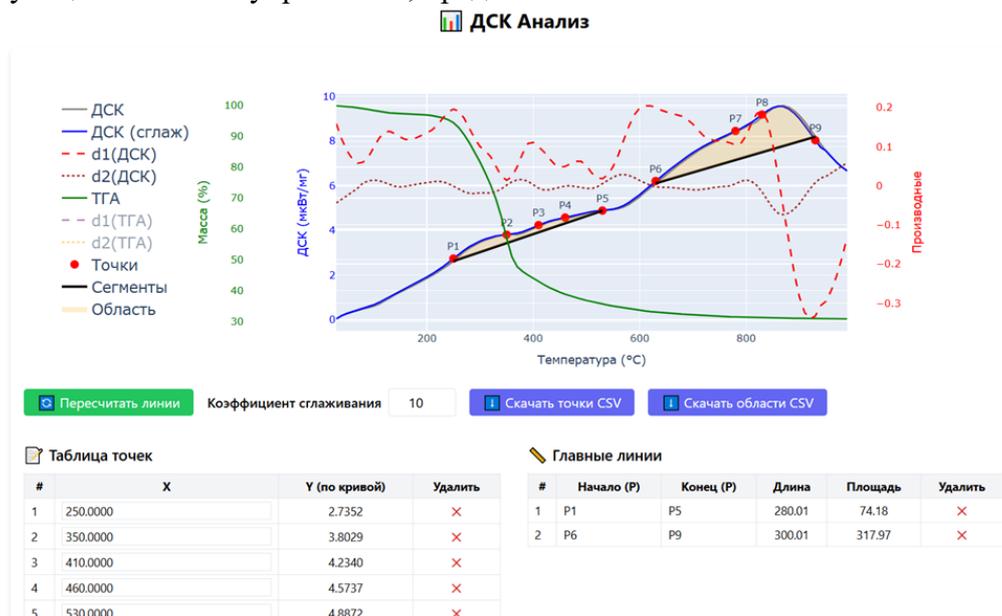


Рис. 2. Интерфейс задачи вычисления энтальпии процесса пиролиза

Исследователю предоставлены следующие возможности:

1. Визуализация ТГА и ДСК кривых.
2. Визуализация значений первой и второй производных ТГА и ДСК кривых.
3. Определение точек событий (список координат всех точек событий).
4. Визуализация главных линий (сегментов), где каждая строка – это отрезок между двумя точками.
5. Расчет энтальпии процесса.
6. Изменение коэффициента сглаживания (окно фильтра Савицкого-Голея).
7. Удаление или добавление точек событий.
8. Пересчет сегментов и площади (нажатием на кнопку "Пересчитать линии").
9. Экспорт таблицы точек в csv-файл.

Рисунок 2 иллюстрирует вычисление энтальпии в случае, когда имеются 9 точек событий (P1, P2 и т. д.). В ходе вычислений определяются 2 главных линии (сегмента) от P1 до P5, от P6 до P9, отделяющих 2 области тепловых эффектов. При этом отображаются начало и конец сегмента (черные линии на графике). Представлены также графики первой (d1) и второй (d2) производных ДСК-кривой пунктирными линиями. В соответствии с представленными возможностями системы пользователь может корректировать ключевые значения. Все значения пересчитываются в реальном времени, график обновляется без перезагрузки.

Заключение. Разработанная интеллектуальная система показала эффективность в задачах моделирования выхода продуктов пиролиза растительной биомассы, сочетая методы машинного обучения и математического моделирования. Внедрение моделей с высокими

значениями метрик качества ($RMSE < 3.9$, $R^2 > 0.8$) обеспечивает надёжное прогнозирование выхода конечных продуктов пиролиза. Особое внимание было уделено созданию инструментов для автоматизированного анализа и идентификации ДСК кривых, что способствует оцениванию тепловых эффектов пиролиза и оптимизации технологических параметров процессов переработки сырья. Возможности визуализации данных ТГА и ДСК облегчают исследователям анализ данных по результатам натуральных экспериментов, что во многом определяет качество интерпретации этих данных и, соответственно, углублённое понимание процессов термического разложения биомассы. Представленная интеллектуальная система находится в процессе развития. В первую очередь это увеличение объема обучающей выборки и расширение базы эталонных ДСК кривых для различных типов сырья и характеристик самого процесса. Эти данные напрямую влияют на возможности совершенствования моделей для прогнозирования параметров процесса пиролиза в динамике. Такая интеграция в систему дополнительных методов интерпретации экспериментальных данных для детального моделирования процесса позволит ей стать важным инструментом для поддержки научных исследований в области прикладных задач совершенствования и оптимизации технологий термической переработки растительного сырья.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта "Фундаментальные проблемы методики разработки и связанного с ней правового и этического регулирования в сфере применения систем и моделей искусственного интеллекта" (FEWZ-2024-0052).

Список источников

1. Ogunsola, N.O., Oh, S.S., Jeon, P.R., et al. Progresses and challenges of machine learning approaches in thermochemical processes for bioenergy: a review. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2024, vol. 41, no. 7, pp. 1923–1953, DOI: 10.1007/s11814-024-00181-7.
2. Khan M., Raza Naqvi S., Ullah Z. et al. Applications of machine learning in thermochemical conversion of biomass - a review. *Fuel*, 2023, vol. 332, p. 126055, DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126055.
3. Fahmy T.Y.A., Fahmy Y., Mobarak F. et al. Biomass pyrolysis: past, present, and future. *Environment, Development and Sustainability*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 17–32, DOI: 10.1007/s10668-018-0200-5.
4. Chen Q., Yang R., Zhao B. et al. Investigation of heat of biomass pyrolysis and secondary reactions by simultaneous thermogravimetry and differential scanning calorimetry. *Fuel*, 2014, vol. 134, pp. 467–476, DOI: 10.1016/j.fuel.2014.05.092.
5. Călin C., Sîrbu E.-E., Tănase M. et al. Thermogravimetric analysis of biomass conversion to biochar: experimental and kinetic modeling. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 21, p. 9856, DOI: 10.3390/app14219856.
6. Ameh V.I., Ayeleru O.O., Nomngongo P.N. et al. Bio-oil production from waste plant seeds biomass as pyrolytic lignocellulosic feedstock and its improvement for energy potential: a review. *Waste Management Bulletin*, 2024, vol. 2, no. 2, pp. 32–48, DOI: 10.1016/j.wmb.2024.03.002.
7. Díaz I., Rodríguez M., Arnaiz C. et al. Biomass pyrolysis kinetics through thermogravimetric analysis. In *Computer Aided Chemical Engineering*, 2013, pp. 1–6, DOI: 10.1016/b978-0-444-63234-0.50001-4.
8. Баденко В.В. Валидация CFD-модели реактора пиролиза с использованием данных термогравиметрического анализа и масс-спектрометрии / В.В. Баденко, А.Н. Козлов, М.В. Пензик // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2025. – Т. 38, № 2. – С. 90-102. – DOI: 10.25729/ESI.2025.38.2.008.
9. Badenko V., Sosnovsky I., Kozlov A. et al. Kinetic and quantitative analysis of gaseous products of thermochemical biomass conversion based on thermogravimetric and mass-spectrometric data. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2024, vol. 18, no. 5, pp. 1254-1266, DOI: 10.1002/bbb.2616.
10. Akinpelu D.A., Adekoya O.A., Oladoye P.O. et al. Machine learning applications in biomass pyrolysis: from biorefinery to end-of-life product management. *Digital Chemical Engineering*, 2023, vol. 8, p. 100103, DOI: 10.1016/j.dche.2023.100103.
11. Chen Q., Xue P., Yang Z. et al. Machine learning for product distribution prediction of one-step pyrolysis model of coal. *Journal of the Energy Institute*, 2025, vol. 121, p. 102152, DOI: 10.1016/j.joei.2025.102152.

12. Rahimi M., Mashhadimoslem H., Vo Thanh H. et al. Yield prediction and optimization of biomass-based products by multi-machine learning schemes: neural, regression and function-based techniques. *Energy*, 2023, vol. 283, p. 128546, DOI: 10.1016/j.energy.2023.128546.
13. Balsora H.K., S K., Joshi J.B. et al. Artificial neural network-based models for the prediction of biomass pyrolysis products from preliminary analysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, vol. 62, no. 37, pp. 14934-14943, DOI: 10.1021/acs.iecr.3c01662.
14. Tsekos C., Tandurella S., de Jong W. Estimation of lignocellulosic biomass pyrolysis product yields using artificial neural networks. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, vol. 157, p. 105180, DOI: 10.1016/j.jaap.2021.105180.
15. Dong Z., Bai X., Xu D. et al. Machine learning prediction of pyrolytic products of lignocellulosic biomass based on physicochemical characteristics and pyrolysis conditions. *Bioresource Technology*, 2023, vol. 367, p. 128182, DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128182.
16. Biomass-pyrolysis-data. GitHub repository. Available at: <https://github.com/dazhaxie666/Biomass-pyrolysis-data> (accessed: 07/01/2025).
17. Shen J., Yan M., Fang M. et al. Machine learning-based modeling approaches for estimating pyrolysis products of varied biomass and operating conditions. *Bioresource Technology Reports*, 2022, vol. 20, p. 101285, DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101285.
18. Simultaneous Thermal Analyzer – STA 449 F5 Jupiter. Analyzing & Testing, NETZSCH-Gerätebau GmbH. Available at: https://analyzing-testing.netzsch.com/_Resources/Persistent/e/7/9/6/e796f7361432facdefd82d616296d644353ace37/STA_449_F5_Jupiter_en_web.pdf (accessed: 07/13/2025).
19. Krishnan S.R., Seelamantula C.S. On the selection of optimum Savitzky-Golay filters. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, vol. 61, no. 2, pp. 380–391, DOI: 10.1109/tsp.2012.2225055.
20. Zhao Y., Qian Y., Zhong G. et al. A thermal characteristics study of typical industrial oil based on thermogravimetric-differential scanning calorimetry (TG-DSC). *Fire*, 2024, vol. 7, no. 11, p. 401, DOI: 10.3390/fire7110401.
21. Angelov R. Application of Simpson’s rule in mathematics education for finding the volume of solids of revolution and polyhedra. *Mathematics, Computer Science and Education*, 2024, vol. 7, no. 1, pp. 29–35, DOI: 10.54664/mgnw7160.
22. Părpăriță E., Brebu M., Azhar Uddin M. et al. Pyrolysis behaviors of various biomasses. *Polymer Degradation and Stability*, 2014, vol. 100, pp. 1–9, DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.01.005.

Бачурин Роман Михайлович. Аспирант Школы компьютерных наук Тюменского Государственного университета. AuthorID: 1255165, SPIN: 6112–8862, ORCID: 0009-0001-2177-3024, romanbachurin@gmail.com, 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Республики, 9.

Захарова Ирина Гелиевна. Кандидат физико-математических наук, профессор, профессор Школы компьютерных наук Тюменского Государственного университета. AuthorID: 197039, SPIN: 9354–2462, ORCID: 0000-0002-4211-7675, i.g.zakharova@utmn.ru, 625003, Россия, г. Тюмень, ул. Республики, 9.

UDC 004.89

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.004

Intelligent data analysis system for the biomass pyrolysis process

Roman M. Bachurin, Irina G. Zakharova

University of Tyumen, Russia, Tyumen, romanbachurin@gmail.com

Abstract. The article presents the results of a study aimed at the development and software implementation of methods for mathematical modeling of the plant biomass pyrolysis process. The main objective of the study is to create an intelligent system for analyzing experimental data, which allows us to study the technological parameters of the pyrolysis process. The key components of the developed system include a set of machine learning models (model quality metrics values $RMSE < 3.9$, $R^2 > 0.8$) for predicting the yield of final pyrolysis products; tools for analyzing differential scanning calorimetry (DSC) curves and assessing the thermal effect of reactions; a

subsystem for identifying and visualizing thermogravimetric (TGA) and DSC curves. The predictive models were trained on a sample (750 records) compiled from open datasets on full-scale experiments on the pyrolysis of plant raw materials. The target variables were the percentage content of solids, liquids, and gases in the final pyrolysis products. Independent variables included the physicochemical characteristics of feedstock and the parameters of the pyrolysis process. The practical significance of this study lies in its potential for a deeper understanding of biomass decomposition processes. The developed system provides researchers and technologists with comprehensive tools for analyzing and identifying DSC curves, facilitating the interpretation of experimental data. The scientific novelty of this work lies in the creation of a unified research support platform based on the integration of machine learning methods with traditional approaches to pyrolysis process analysis. This significantly improves forecasting accuracy and optimizes the pyrolysis process for obtaining end products. The results of this study can be applied in research in the field of thermochemical processes, applied bioenergy, the chemical industry, and other areas related to biomass processing by pyrolysis. Future development of the system involves expanding the DSC curve database, improving machine learning algorithms, and integrating additional experimental data analysis methods for a detailed interpretation of the pyrolysis process, taking into account its dynamics.

Keywords: biomass pyrolysis, mathematical modeling, machine learning, neural networks, differential scanning calorimetry

Acknowledgements: This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FEWZ-2024-0052.

References

1. Ogunsola, N.O., Oh, S.S., Jeon, P.R., et al. Progresses and challenges of machine learning approaches in thermochemical processes for bioenergy: a review. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2024, vol. 41, no. 7, pp. 1923–1953, DOI: 10.1007/s11814-024-00181-7.
2. Khan M., Raza Naqvi S., Ullah Z. et al. Applications of machine learning in thermochemical conversion of biomass - a review. *Fuel*, 2023, vol. 332, p. 126055, DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126055.
3. Fahmy T.Y.A., Fahmy Y., Mobarak F. et al. Biomass pyrolysis: past, present, and future. *Environment, Development and Sustainability*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 17–32, DOI: 10.1007/s10668-018-0200-5.
4. Chen Q., Yang R., Zhao B. et al. Investigation of heat of biomass pyrolysis and secondary reactions by simultaneous thermogravimetry and differential scanning calorimetry. *Fuel*, 2014, vol. 134, pp. 467–476, DOI: 10.1016/j.fuel.2014.05.092.
5. Călin C., Sîrbu E.-E., Tănase M. et al. Thermogravimetric analysis of biomass conversion to biochar: experimental and kinetic modeling. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 21, p. 9856, DOI: 10.3390/app14219856.
6. Ameh V.I., Ayeleru O.O., Nomngongo P.N. et al. Bio-oil production from waste plant seeds biomass as pyrolytic lignocellulosic feedstock and its improvement for energy potential: a review. *Waste Management Bulletin*, 2024, vol. 2, no. 2, pp. 32–48, DOI: 10.1016/j.wmb.2024.03.002.
7. Díaz I., Rodríguez M., Arnaiz C. et al. Biomass pyrolysis kinetics through thermogravimetric analysis. In *Computer Aided Chemical Engineering*, 2013, pp. 1–6, DOI: 10.1016/b978-0-444-63234-0.50001-4.
8. Badenko V.V., Kozlov A.N., Penzik M.V. Validatsiya CFD-modeli reaktora piroliza s ispol'zovaniyem dannyykh termogravimetricheskogo analiza i mass-spektrometrii [Validation of a pyrolysis reactor CFD model using thermogravimetric analysis and mass spectrometry data]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2025, vol. 38, no. 2, pp. 90-102, DOI: 10.25729/ESI.2025.38.2.008.
9. Badenko V., Sosnovsky I., Kozlov A. et al. Kinetic and quantitative analysis of gaseous products of thermochemical biomass conversion based on thermogravimetric and mass-spectrometric data. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2024, vol. 18, no. 5, pp. 1254-1266, DOI: 10.1002/bbb.2616.
10. Akinpelu D.A., Adekoya O.A., Oladoye P.O. et al. Machine learning applications in biomass pyrolysis: from biorefinery to end-of-life product management. *Digital Chemical Engineering*, 2023, vol. 8, p. 100103, DOI: 10.1016/j.dche.2023.100103.
11. Chen Q., Xue P., Yang Z. et al. Machine learning for product distribution prediction of one-step pyrolysis model of coal. *Journal of the Energy Institute*, 2025, vol. 121, p. 102152, DOI: 10.1016/j.joei.2025.102152.
12. Rahimi M., Mashhadimoslem H., Vo Thanh H. et al. Yield prediction and optimization of biomass-based products by multi-machine learning schemes: neural, regression and function-based techniques. *Energy*, 2023, vol. 283, p. 128546, DOI: 10.1016/j.energy.2023.128546.
13. Balsora H.K., S K., Joshi J.B. et al. Artificial neural network-based models for the prediction of biomass pyrolysis products from preliminary analysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, vol. 62, no. 37, pp. 14934-14943, DOI: 10.1021/acs.iecr.3c01662.

14. Tsekos C., Tandurella S., de Jong W. Estimation of lignocellulosic biomass pyrolysis product yields using artificial neural networks. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, vol. 157, p. 105180, DOI: 10.1016/j.jaap.2021.105180.
15. Dong Z., Bai X., Xu D. et al. Machine learning prediction of pyrolytic products of lignocellulosic biomass based on physicochemical characteristics and pyrolysis conditions. *Bioresource Technology*, 2023, vol. 367, p. 128182, DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128182.
16. Biomass-pyrolysis-data. GitHub repository. Available at: <https://github.com/dazhaxie666/Biomass-pyrolysis-data> (accessed: 07/01/2025).
17. Shen J., Yan M., Fang M. et al. Machine learning-based modeling approaches for estimating pyrolysis products of varied biomass and operating conditions. *Bioresource Technology Reports*, 2022, vol. 20, p. 101285, DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101285.
18. Simultaneous Thermal Analyzer – STA 449 F5 Jupiter. Analyzing & Testing, NETZSCH-Gerätebau GmbH. Available at: https://analyzing-testing.netzsch.com/_Resources/Persistent/e/7/9/6/e796f7361432facdefd82d616296d644353ace37/STA_449_F5_Jupiter_en_web.pdf (accessed: 07/13/2025).
19. Krishnan S.R., Seelamantula C.S. On the selection of optimum Savitzky-Golay filters. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, vol. 61, no. 2, pp. 380–391, DOI: 10.1109/tsp.2012.2225055.
20. Zhao Y., Qian Y., Zhong G. et al. A thermal characteristics study of typical industrial oil based on thermogravimetric-differential scanning calorimetry (TG-DSC). *Fire*, 2024, vol. 7, no. 11, p. 401, DOI: 10.3390/fire7110401.
21. Angelov R. Application of Simpson’s rule in mathematics education for finding the volume of solids of revolution and polyhedra. *Mathematics, Computer Science and Education*, 2024, vol. 7, no. 1, pp. 29–35, DOI: 10.54664/mgnw7160.
22. Părpăriță E., Brebu M., Azhar Uddin M. et al. Pyrolysis behaviors of various biomasses. *Polymer Degradation and Stability*, 2014, vol. 100, pp. 1–9, DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.01.005.

Bachurin Roman Mikhailovich. Postgraduate student at the School of Computer Sciences at the University of Tyumen. AuthorID: 1255165, SPIN: 6112-8862, ORCID: 0009-0001-2177-3024, romanbachurin@gmail.com, 625003, Russia, Tyumen, Respubliki St., 9.

Zakharova Irina Gelievna. Professor (PhD) at the School of Computer Sciences at the University of Tyumen. AuthorID: 197039, SPIN: 9354-2462, ORCID: 0000-0002-4211-7675, i.g.zakharova@utmn.ru, 625003, Russia, Tyumen, Respubliki St., 9.

Статья поступила в редакцию 29.09.2025; одобрена после рецензирования 15.02.2026; принята к публикации 16.02.2026.

The article was submitted 09/29/2025; approved after reviewing 02/15/2026; accepted for publication 02/16/2026.

Применение интеллектуального анализа данных для поиска взаимосвязи между результатами ЕГЭ и академической успеваемостью студентов ВУЗа

Китаева Ольга Игоревна

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Россия, Иркутск, *koi_fk@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматривается применение интеллектуального анализа образовательных данных для сравнения результатов успеваемости и баллов Единого государственного экзамена (ЕГЭ), студентов, обучающихся по ИТ-специальностям ВУЗа. Актуальность темы обусловлена необходимостью принимать объективные и обоснованные решения для повышения результативности образовательного процесса. Основным методом является получение интеллектуально улучшенных визуальных форм данных для более эффективного понимания скрытых в них закономерностей.

В работе рассмотрены возможности применения программного продукта с открытым кодом «Orange» для реализации интеллектуального анализа образовательных данных с целью определения взаимосвязи между показателями ЕГЭ и академической успеваемостью студентов. Рассмотрены задачи: оценка влияния результатов ЕГЭ на успешность учебы студента в ВУЗе, определение возможности использования результатов ЕГЭ как индикатора академической успеваемости студента, выявление студентов, находящихся в зоне риска по результатам ЕГЭ.

Визуальное программирование, реализуемое удобным графическим интерфейсом программного обеспечения Orange Data Mining, позволило получить интересные и полезные иллюстративные материалы, наглядно демонстрирующие связь баллов ЕГЭ с оценками, полученными студентами на первом курсе, и последующей результативностью обучения в ВУЗе. Использование виджета Box Plot обеспечило необходимую статистическую информацию.

Возможность оценивания студентов, исходя из имеющихся результатов ЕГЭ, в момент поступления в ВУЗ, очевидно, полезна и оправдана, т.к. на момент поступления в университет эта информация наиболее доступна и информативна. В ходе исследования использована классификация студентов, исходя из итогов обучения на младших курсах ВУЗа. Выявленные закономерности подтверждают целесообразность использования результатов ЕГЭ для прогнозирования успешности студента ВУЗа. Вместе с тем, полученные результаты показывают, что часть обучающихся, имеющих высокие баллы по ЕГЭ, впоследствии перестают учиться. Этот факт указывает на необходимость использования дополнительных показателей, в частности, постоянного мониторинга посещаемости и текущей успеваемости для своевременного выявления студентов, нуждающихся в дополнительной поддержке.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ образовательных данных, Orange, анализ текущей успеваемости студентов, визуализация

Цитирование: Китаева О.И. Применение интеллектуального анализа данных для поиска взаимосвязи между результатами ЕГЭ и академической успеваемостью студентов ВУЗа / О.И. Китаева // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С.68-78. – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.005.

Введение. Рассматриваемая тема привлекала и привлекает внимание авторов статей, являющихся преимущественно преподавателями ВУЗов, что говорит о большой заинтересованности в стремлении использовать все возможные приемы для повышения качества образования. Вместе с тем, приведенные результаты существенно разнятся. Так Рочев К.В., Куделин А.Г., Семяшкина А.В. указывают на явную корреляцию между результатами ЕГЭ и средней успеваемостью студентов [1]. В результате их исследования выявлена зависимость между диапазоном баллов ЕГЭ, полученных при поступлении, и последующими успехами, выраженными средним баллом и итоговыми дипломными оценками. В то время, как Бурухина Т. Ф., Винокуров Е. Г. считают [2], что результаты ЕГЭ обладают слабой прогностической способностью в отношении успешности обучения в высшей школе. Вместе с тем, авторы [2] считают, что «решение проблемы успешной адаптации первокурсников в масштабах каждого образовательного учреждения позволяет

повысить успеваемость обучающихся, уменьшить отсев, снизить пропуски занятий без уважительных причин, поднять уровень творческой, профессиональной и социальной активности студенчества и, в итоге, повысить качество образования до уровня, соответствующего запросам общественного развития». Вызывает интерес мнение Комковой О.Г., Переведенцевой С.Е., Ворсиной Е.В. [3] о том, что высокие баллы по результатам ЕГЭ могут служить лишь предикторами академической успеваемости студентов ВУЗа на начальных курсах. Авторы считают, что значение принадлежит таким компонентам личности обучающегося, как мотивация, интерес, система ценностей, ответственность, преодоление и продвижение себя. Сычев О.А. также считает [4], что для прогнозирования будущей успеваемости студентов и профилактики неуспеваемости полезно учитывать не только результаты ЕГЭ, но и учебную мотивацию студентов. Аналогичное мнение высказывает Нуриева Л.М. [5]: «Связь результатов ЕГЭ с успехами в вузе существует постольку, поскольку они измеряют одну и ту же характеристику студента: отношение к учебе. При этом перечень вступительных экзаменов почти не имеет значения, а прогностическая ценность профильных экзаменов (на примере математики) оказалась невысока». В статье «Результаты ЕГЭ и успеваемость студентов первого курса» [6] Щеголева Л. В. и Суровцова Т.Г. обращают внимание на то, что имеющееся в вузе большое количество данных, связанных с учебным процессом, практически не используется при формировании управленческих решений. Рассматривая проблему преемственности общеобразовательной и высшей школы, авторы [6] считают, что с точки зрения управления деятельностью вуза, введение комплексного мониторинга успеваемости с использованием баллов ЕГЭ позволит решить ряд задач по организации учебного процесса.

В данном случае целью является проверка гипотезы «существует значимая связь между баллами ЕГЭ и успеваемостью студентов», т.е. определение, насколько хорошо высокие баллы ЕГЭ предсказывают успешность обучения. Оценка уровня связи позволит, кроме повышения качества обучения и разработки программ поддержки слабых студентов, уделить внимание определению факторов, влияющих на изменение мотивации обучения студентов с высоким баллом ЕГЭ после поступления в вуз. Таким образом, поиск взаимосвязи между результатами ЕГЭ и академической успеваемостью студентов позволит указать пути решения одной из важных задач – повышение результативности образовательного процесса в ВУЗе.

Для проверки выдвинутой гипотезы используется Интеллектуальный анализ образовательных данных (от англ. Educational Data Mining) (ИАОД). ИАОД – совокупность методов и алгоритмов анализа данных, накапливаемых в учебном заведении в процессе его деятельности с целью выявления скрытых, неочевидных, практически полезных и интерпретируемых знаний об учебном процессе и его участниках для поддержки и принятия решений [7]. Это направление исследований, связанное с применением методов интеллектуального анализа данных (Data mining) [8-10], машинного обучения и статистики к информации, производимой образовательными учреждениями. В качестве инструмента исследования используется программный продукт Orange Data Mining

Основные задачи поиска взаимосвязи между результатами ЕГЭ и академической успеваемостью студентов ВУЗа. Основные задачи настоящего исследования приведены в таблице 1. Решение поставленных задач выполняется на базе результатов ЕГЭ и другой информации о студентах ИТ-специальностей Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ).

Таблица 1. Задачи исследования

	Задача	Цель решения задачи
1	Определить, могут ли результаты ЕГЭ быть индикатором академической успеваемости студента	Определение целесообразности прогнозирования успешности студента ВУЗа, исходя из результатов ЕГЭ
2	Оценить влияние результатов ЕГЭ на успешность учебы студента в ВУЗе	Своевременная корректировка образовательной траектории студента
3	Выявление студентов, находящихся в зоне риска по результатам ЕГЭ	Выявление пороговых значений, при которых результаты ЕГЭ наиболее точно выявляют студентов, нуждающихся в дополнительной поддержке.

Использование программного продукта Orange Data Mining для решения поставленных задач. Orange – свободно распространяемая библиотека, написанная на языке Python, основанная на принципе визуального программирования для наглядного доступа к алгоритмам Data mining. Разработана и поддерживается Bioinformatics Laboratory of the Faculty of Computer and Information Science Люблянского университета (Словения). Компоненты аналитической платформы называются виджетами и варьируются от минималистичной визуализации данных, выбора подмножеств и предварительной обработки до эмпирической оценки алгоритмов обучения и прогностического моделирования [11-14].

Основные этапы использования программы Orange:

1. Подготовка данных:
 - загрузка данных: импорт данных из файлов с помощью модуля "File",
 - обзор и визуализация: использование "Data Table", "Distributions" и "Box Plot" для предварительного анализа.
2. Предварительная обработка:
 - очистка,
 - масштабирование,
 - выбор признаков.
3. Построение моделей:
 - выбор алгоритма (например, «Logistic Regression», «Decision Tree», «k-NN»),
 - соединение модуля данных с модулем модели,
 - настройка параметров модели.
4. Обучение и тестирование модели:
 - разделение данных на обучающую и тестовую выборки (например, с помощью «Data Sampler»),
 - обучение модели и оценка её эффективности (например, с помощью «Test & Score»).
5. Визуализация и интерпретация результатов.
6. Применение модели.

Структура данных, использованная для решения Задачи 1 «Определить, могут ли результаты ЕГЭ быть индикатором академической успеваемости студента» приведена в таблице 2. Схема анализа данных в Orange Data Mining показана на рис.1.

Таблица 2. Структура данных

Имя переменной	Назначение	Тип переменной
id	номер студента в списке	числовой
группа	название учебной группы	текстовый
курс	номер курса	числовой
Русский язык ЕГЭ	балл ЕГЭ по русскому языку	числовой

Математика ЕГЭ	балл ЕГЭ по математике	числовой
Физика ЕГЭ	балл ЕГЭ по физике	числовой
Информатика ЕГЭ	балл ЕГЭ по информатике	числовой
информатика/физика	дисциплина на выбор	текстовый
категория	категория студента	текстовый
Математика ВУЗ	оценка по математике в ВУЗе	числовой
Вовремя математика	признак сдачи математики вовремя	категориальный
Физика ВУЗ	оценка по физике в ВУЗе	числовой
Вовремя физика	признак сдачи физики вовремя	категориальный
Информатика ВУЗ	экзаменационная оценка	числовой
Вовремя информатика	признак сдачи информатики вовремя	категориальный

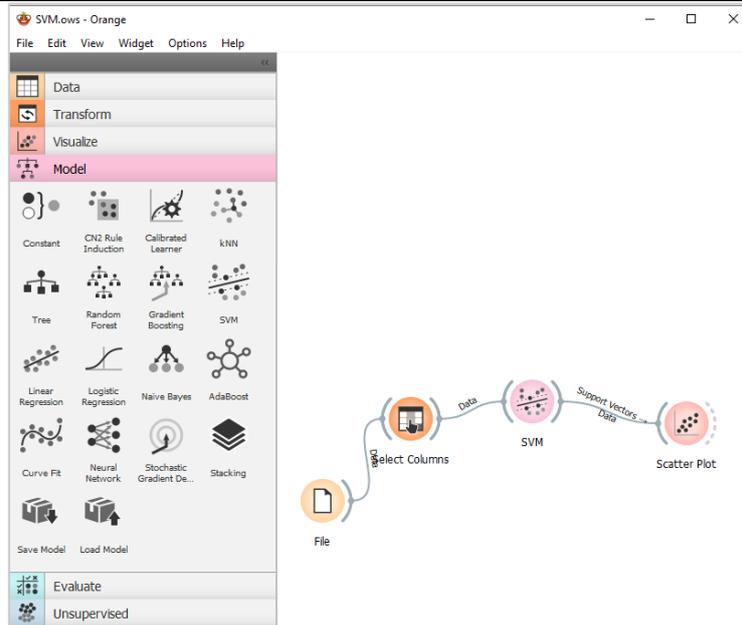


Рис. 1. Схема анализа данных в Orange Data Mining

На рис. 2 показаны результаты сравнения результатов ЕГЭ (информатика, математика,) с оценками в ВУЗе. Каждая точка на графике показывает информацию по конкретному студенту: горизонтальная ось – оценка по соответствующей дисциплине в ВУЗе, вертикальная – балл ЕГЭ, диапазоны цветов точек показаны в нижнем правом углу графиков. Значение «0» для оценки в ВУЗе соответствует несданному экзамену.

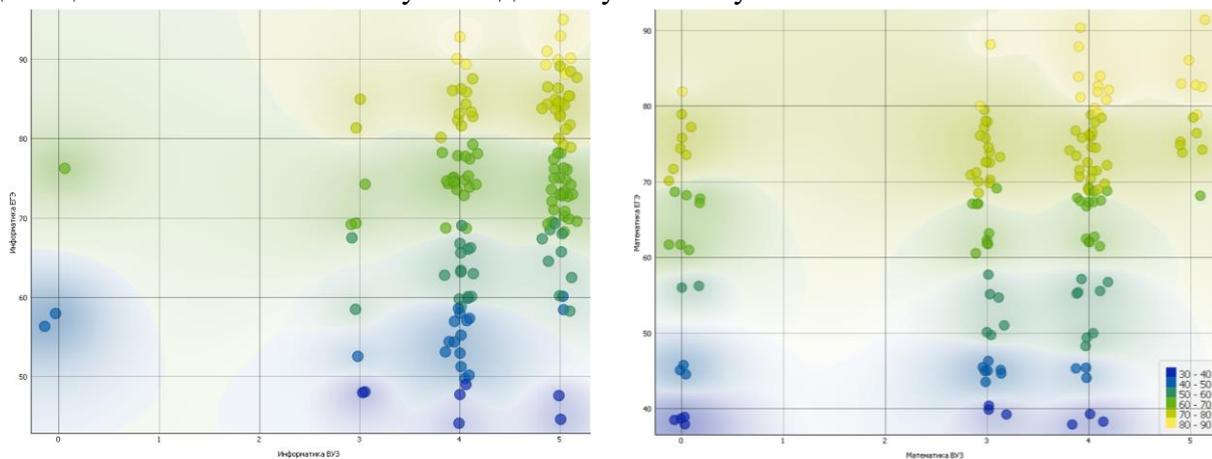


Рис. 2. Сравнение результатов ЕГЭ (информатика, математика,) с оценками в ВУЗе

Полученные графики (рис. 2) с точки зрения рассматриваемой задачи дают, на первый взгляд, разные выводы по выбранным дисциплинам. Первый из графиков, где оценки, полученные по информатике в ВУЗе, сравниваются с результатами ЕГЭ, несомненно подтверждает возможность использовать результаты ЕГЭ, как индикатор академической успеваемости студента. Вероятно, этому способствует и тот факт, что программа информатики в ВУЗе во многом близка школьной программе по этой дисциплине. Второй график позволяет сделать два неоднозначных вывода. Первый совпадает с предыдущим, как видно из рисунка 2, отличные оценки по математике получены студентами с высоким баллом ЕГЭ. Второй вывод касается студентов, не сдавшим математику во время сессии (точки на графике, соответствующие оценке 0), балл ЕГЭ у этих студентов находится в диапазоне от 39 до 82, этому может быть несколько причин, первая из которых – различие учебных программ и требований ВУЗа и школы. Следующие причины относятся скорее всего к проблемам адаптации к формату высшего образования. Таким образом, не отрицая целесообразность прогнозирования успешности студента ВУЗа, исходя из результатов ЕГЭ, необходимо находить и рассматривать и другие факторы.

Для решения задачи «Оценить влияние результатов ЕГЭ на успешность учебы студента в ВУЗе» в структуру данных, представленную в таблице 2, добавлена категориальная переменная «Успех», которая показывает, продолжает ли конкретный студент обучаться на момент анализа информации (в данном случае на 3 курсе).

Для сравнения балла ЕГЭ и успешного продолжения обучения использована схема, показанная на рисунке 3.

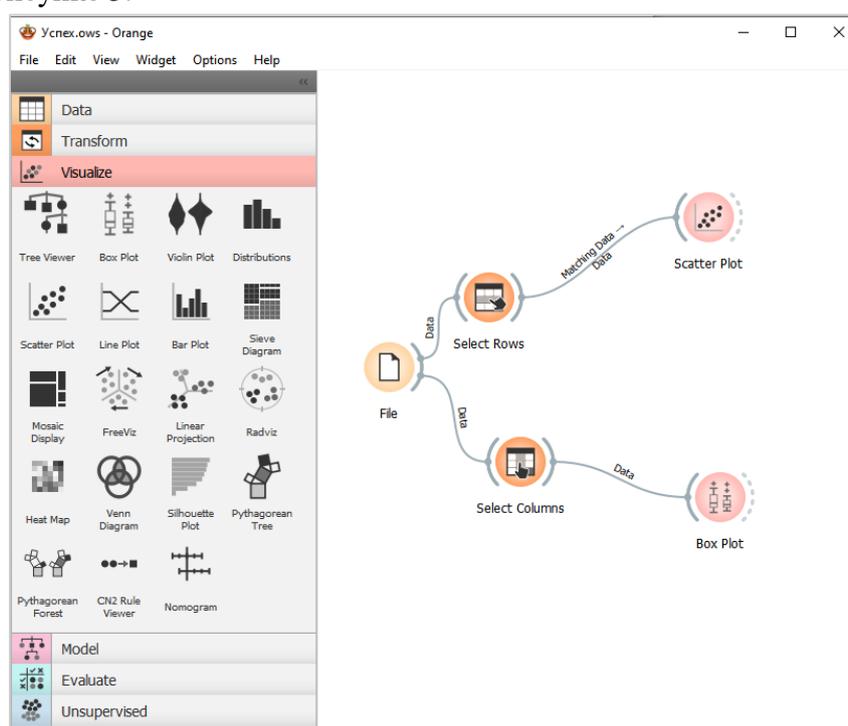


Рис. 3. Сравнение результатов ЕГЭ относительно переменной «Успех»

На рисунке 4 с левой стороны представлена визуализация результатов ЕГЭ по математике студентов, продолжающих обучение на 3 курсе, а с правой – тех, кто по каким-то причинам прервал обучение. Показанные на рисунке 4 результаты явно свидетельствуют о том, что балл ЕГЭ слабо влияет на то, продолжает ли студент заниматься непрерывно; разные интервалы результатов ЕГЭ, в том числе и весьма высокие, встречаются и в левой, и в правой частях рисунка.

На рисунке 5 показаны результаты сравнения баллов ЕГЭ студентов, прервавших и продолживших обучение, с использованием виджета Vox Plot. Vox Plot позволяет получить график, известный в описательной статистике под названиями «Ящик с усами», «Диаграмма размаха», «Усыковая диаграмма», «Коробчатая диаграмма». В этом случае верхний из графиков для каждой из дисциплин характеризует студентов, прервавших обучение, а нижний – продолживших. В контексте рассматриваемой задачи, синяя область («Коробка» или «Ящик») представляет межквартильный размах (IQR), распределение основных 50% студентов по баллам, и показывает диапазон, в котором сконцентрированы большинство результатов. Желтая вертикальная линия – медиана, средний или типичный балл, половина студентов набрала меньше этого значения, половина – больше. Среднее значение – тёмно-синяя вертикальная линия. Синяя линия – Усы (whiskers) – диапазон, охватывающий данные без выбросов. Тонкая пунктирная линия – Выбросы (outliers) – очень низкие или очень высокие результаты (например, студенты с необычно низкими или высокими баллами).

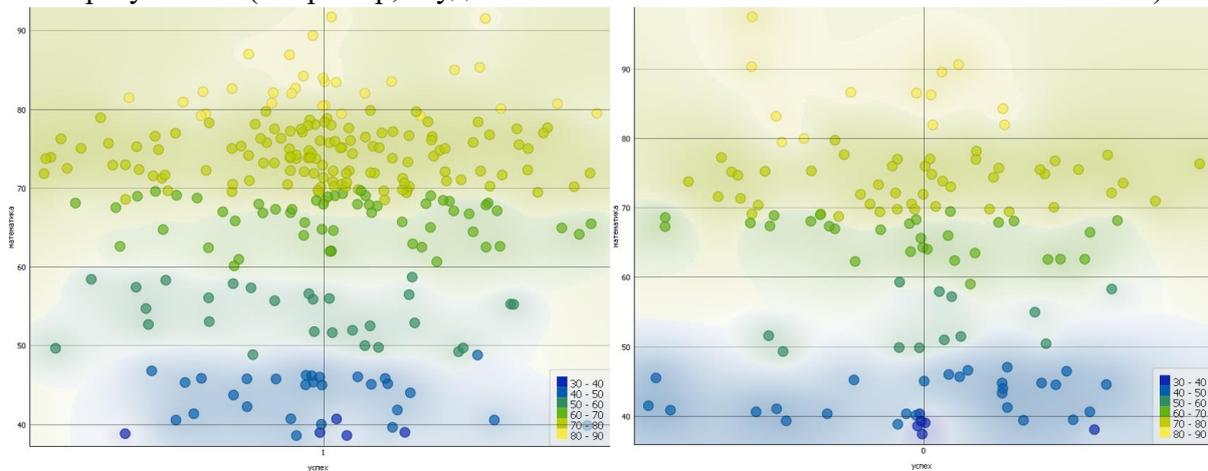
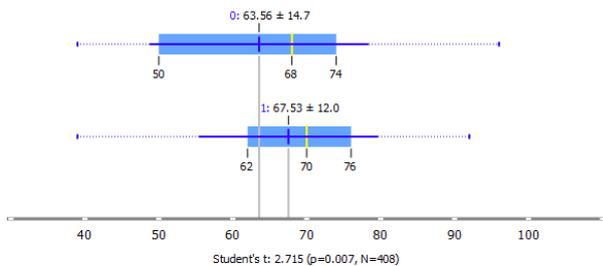
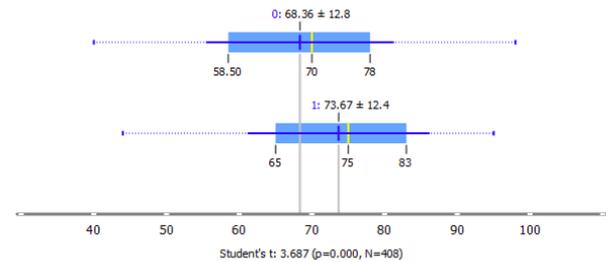


Рис. 4. Связь результатов ЕГЭ по математике с переменной «Успех» (1)

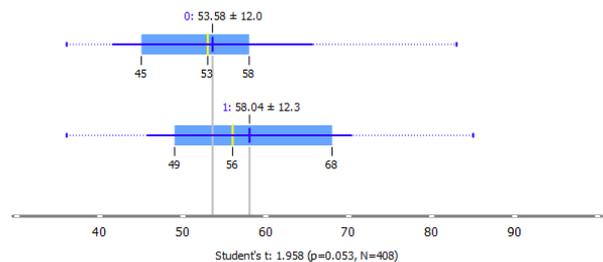
Математика



Информатика



Физика



Русский язык

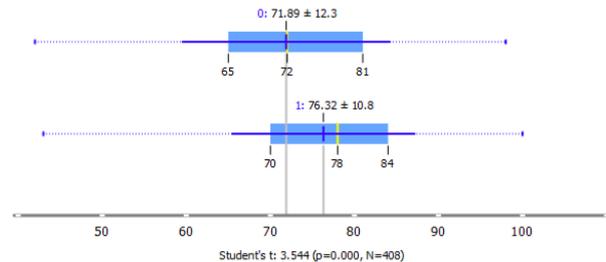


Рис. 5. Связь результатов ЕГЭ с переменной «Успех» (2)

При решении поставленной задачи наиболее логичным представляется использовать межквартильный размах (IQR) и диапазон баллов ЕГЭ, охватывающий данные без выбросов (whiskers); соответствующие значения приведены в таблице 3.

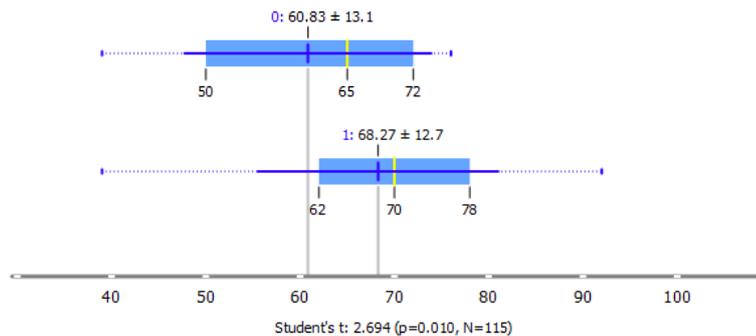
Таблица 3. Влияние балла ЕГЭ на продолжение обучения

	Математика		Русский язык		Физика		Информатика	
	IQR	whiskers	IQR	whiskers	IQR	whiskers	IQR	whiskers
Продолжают обучение	62-76	56-80	70-84	65-88	49-68	46-72	65-83	62-86
Прекратили обучение	50-74	48-79	65-81	60-85	45-58	42-66	59-78	56-82

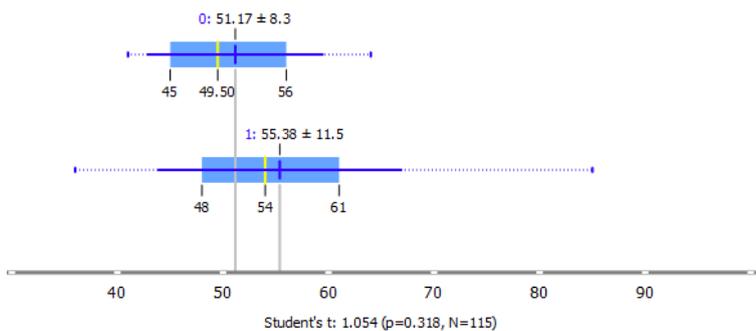
Значения, представленные в таблице, не противоречат выводам, сделанным выше, о том, что результат ЕГЭ не оказывает существенного влияния, на то, продолжает ли студент обучение. Исключение представляют результаты по математике, здесь, как видно из таблицы, прекращению обучения, вероятнее всего, соответствует низкий балл ЕГЭ.

Для определения пороговых значений для предсказания академических успехов по результатам ЕГЭ (задача «Выявление студентов, находящихся в зоне риска по результатам ЕГЭ») выполнено сравнение балла ЕГЭ и категориальной переменной, показывающей, была ли сдана вовремя соответствующая дисциплина в первом семестре обучения. Результаты сравнения показаны на рисунке 6, здесь вновь использован виджет Box Plot, т.е. результаты представлены в форме «Ящик с усами». Верхний график соответствует студентам, не сдавшим вовремя соответствующую дисциплину в первом семестре, нижний – сдали вовремя. Под пороговым значением будем понимать конкретное значение балла ЕГЭ, ниже которого студент попадает в зону риска.

Математика



Физика



Информатика

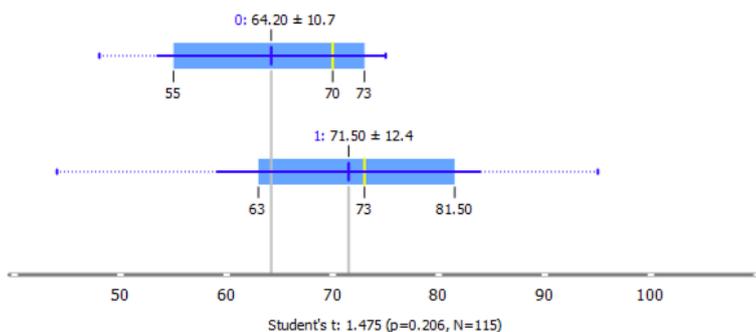


Рис. 6. Связь результатов ЕГЭ и своевременной сдачи дисциплин

Для сравнения результатов, представленных на рис. 6, все студенты были разделены на три группы: неуспевающие студенты, потенциально успешные (студенты с равной вероятностью успеха и неуспеха) и успешные (успевающие) студенты. В таблицу 4 сведены результаты ЕГЭ относительно предложенной выше классификации.

Таблица 4. Влияние балла ЕГЭ на успешность обучения

Дисциплина	Баллы ЕГЭ, неуспевающих студентов	Баллы ЕГЭ, потенциально успешных студентов	Баллы ЕГЭ, успешных студентов
Математика	48-56	56-74	74-82
Физика	42-44	44-58	58-68
Информатика	53-58	58-75	75-84

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Отрицать влияние балла ЕГЭ на успешность обучения не верно, несмотря на то, что в целом ряде случаев связь результатов ЕГЭ с последующими итогами обучения не всегда прослеживается.
2. Возможность классификации студентов, исходя из имеющихся результатов ЕГЭ, в момент поступления в ВУЗ, очевидно полезна и оправдана, хотя бы потому, что на начальном этапе других сведений о поступивших или нет, или они не достаточны.
3. Тот факт, что обучающиеся, имеющие высокие баллы по ЕГЭ, впоследствии перестают учиться, говорит о необходимости постоянного мониторинга посещаемости и текущей успеваемости для своевременного выявления студентов, требующих поддержки.
4. Сравнение результатов, представленных в таблицах 3 и 4, говорит о необходимости постоянного внимания и своевременных корректирующих действий для всех студентов, вне зависимости от того, к какой группе из предложенной выше классификации они относятся.

Заключение. Интеллектуальный анализ образовательных данных позволяет использовать данные об учебном процессе и его участниках для выявления скрытых, неочевидных, практически полезных и интерпретируемых знаний [15]. В ходе исследования были проанализированы данные о студентах, обучающихся по программам ИТ-направления бакалавриата. Использован программный продукт с открытым исходным кодом Orange date mining. Визуальные данные, полученные программой Orange, не доказали и не опровергли связь балла ЕГЭ, имеющегося при поступлении, с успешностью обучения в ВУЗе. Значительная доля студентов, прекративших обучение, несмотря на высокий балл ЕГЭ, очевидно, обусловлена сложным сочетанием психологических, социальных, финансовых и академических факторов. Высокие результаты ЕГЭ, как правило, не гарантируют сохранение мотивации или устойчивого образовательного успеха в дальнейшем.

Предложено на базе результатов, полученных на основе интеллектуального анализа данных (сравнения баллов ЕГЭ и академической успеваемости) с применением программного продукта Orange, выявлять обучающихся, находящихся в зоне риска, для выполнения корректирующих действий с целью улучшения качества образовательного процесса и повышения академической успеваемости студентов. В этой связи представляется интересным продолжить исследование с учетом дополнительных факторов, таких, как интервал времени между сдачей ЕГЭ и поступлением в ВУЗ, а также сравнение успешности студентов, поступивших после окончания колледжа и сдававших ЕГЭ.

Список источников

1. Рочев К.В. Исследование комплексного влияния ЕГЭ на академическое развитие студентов / К.В. Рочев, А.Г. Куделин, А.В. Семяшкина. – DOI: 10.60797/IRJ.2024.147.49.
2. Бурухина Т.Ф. Анализ успеваемости студентов младших курсов и ее связи с результатами ЕГЭ / Т.Ф. Бурухина, Е.Г. Винокуров. – DOI: 10.31862/2218-8711-2021-2-139-147.

3. Комкова О.Г. Исследование взаимосвязи учебной успеваемости студентов-первокурсников медицинского вуза с высокими стартовыми показателями / О.Г. Комкова, С.Е. Переведенцева, Е.В. Ворсина // Психолого-педагогический журнал «Гаудеамус», 2024. – Т. 23. – № 3. – С. 38-47. – DOI: 10.20310/1810-231X-2024-23-3-38-47.
4. Сычев О.А. Результаты ЕГЭ и мотивация как предикторы долгосрочной успеваемости студентов педагогического вуза // Психологическое здоровье и психологическая культура в современном российском образовании: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции, 2015. – С. 175-178.
5. Нуриева Л.М. Анализ связи результатов ЕГЭ с академической успеваемостью студентов-первокурсников // Познание и деятельность: от прошлого к настоящему: материалы II Всероссийской междисциплинарной научной конференции. – Омск, 2020. – С. 171-175.
6. Щеголева Л.В. Результаты ЕГЭ и успеваемость студентов первого курса / Л.В. Щеголева, Т.Г. Суровцова // Непрерывное образование: XXI век, 2015. – № 4 (12). – С. 33-41.
7. Оськин А.Ф. Применение интеллектуального анализа образовательных данных для прогнозирования успешности учебной деятельности / А.Ф. Оськин, Д.А. Оськин // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки, 2016. – № 4. – URL: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/17089/5/8-12.pdf> (дата обращения: 20.08.2025).
8. Дюк В. Data Mining: учебный курс / В. Дюк, А. Самойленко. – СПб.: Питер, 2001. – 368 с.
9. Паклин Н.Б. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям / Н.Б. Паклин, В.И. Орешков. – СПб.: Питер, 2013. – 704 с.
10. Агаев Ф.Т. Прогнозирование успеваемости студентов в электронном образовании с использованием методов data mining / Ф.Т. Агаев, Г.А. Мамедова, Р.Т. Меликова. – URL: <https://bik.sfu-kras.ru/ft/LIB2/ELIB/b74/free/i-489634964.pdf> (дата обращения: 20.08.2025).
11. Orange: Описание, Функции и Интерфейс // Soware. – 2025. – URL: <https://soware.ru/products/orange> (дата обращения: 21.08.2025).
12. Тюшняков В.Н. Интеллектуальный анализ маркетинговой деятельности на основе применения инструментов Orange data mining / В.Н. Тюшняков // Вестник Таганрогского института имени А.П. Чехова, 2024. – № 2. – С. 103-107.
13. Юсупов Н. Исследование методов классификации в программе Orange / Н. Юсупов, А. Савельева, О.Г. Леонова // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова, 2020. – Т. 1. – С. 27-30.
14. Юсупов Н. Исследование методов кластеризации в программе Orange / Н. Юсупов // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова, 2020. – Т. 1. – С. 35-37.
15. Китаева О.И. Интеллектуальный анализ образовательных данных учебной дисциплины с использованием программы Orange / О.И. Китаева // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 1(29). – С. 190-200. – DOI: 10.25729/ESI.2023.29.1.016.

Китаева Ольга Игоревна. Старший преподаватель института информационных технологий и анализа данных Иркутского национального исследовательского технического университета, руководитель отдела по работе со студентами, сфера научных интересов: Интеллектуальный анализ образовательных данных. AuthorID: 688343, SPIN: 6638-7790.

UDC 378.14.015.62

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.005

The use of data mining to find the relationship between the results of the unified state exam and the academic performance of university students

Olga I. Kitaeva

Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk, koi_fk@mail.ru

Abstract. The article discusses the use of intellectual analysis of educational data to compare the results of academic performance and scores of the Unified State Exam (USE), students studying in the IT specialties of the university. The relevance of the topic is due to the need to make objective and informed decisions to improve the effectiveness of the educational process. The main method is to obtain intelligently enhanced visual forms of data for a more effective understanding of the patterns hidden in them.

The paper considers the possibilities of using the open source software product "Orange" to implement the intellectual analysis of educational data in order to determine the relationship between the USE indicators and the academic performance of students. The tasks are considered: assessing the impact of the USE results on the student's academic success at the university, determining the possibility of using the USE results as an indicator of student academic achievement, identifying students at risk based on the results of the USE.

Visual programming, implemented by the user-friendly graphical interface of the Orange Data Mining software, allowed us to obtain interesting and useful illustrative materials that clearly demonstrate the relationship between USE scores, grades received by students in their first year and the subsequent effectiveness of their studies at the university. Using the Box Plot widget provided the necessary statistical information.

The possibility of evaluating students based on the available USE results at the time of admission to the university is obviously useful and justified, because at the time of admission to the university, this information is the most accessible and informative. In the course of the study, the classification of students was used based on the results of their studies at the junior courses of the university. The revealed patterns confirm the expediency of using the results of the Unified State Exam to predict the success of a university student. At the same time, the results show that some students who have high scores on the Unified State Exam subsequently stop studying. This fact indicates the need to use additional indicators, in particular, constant monitoring of attendance and current academic performance in order to identify students in need of additional support in a timely manner.

Keywords: intellectual analysis of educational data, Orange, analysis of current student performance, visualization

References

1. Rochev K.V., Kudelin A.G., Semyashkina A.V. Issledovaniye kompleksnogo vliyaniya YeGE na akademicheskoye razvitiye studentov [Study of the comprehensive impact of the Unified State Exam on students' academic development], DOI: 10.60797/IRJ.2024.147.49.
2. Burukhina T.F., Vinokurov E.G. Analiz uspeyayemosti studentov mladshikh kursov i yeye svyazi s rezul'tatami YeGE [Analysis of junior students' academic performance and its connection with the results of the Unified State Exam], DOI: 10.31862/2218-8711-2021-2-139-147.
3. Komkova O.G., Perevedentseva S.E., Vorsina E.V. Issledovaniye vzaimosvyazi uchebnoy uspeyayemosti studentov-pervokursnikov meditsinskogo vuza s vysokimi startovymi pokazatelyami [Study of the relationship between the academic performance of first-year medical university students and high starting indicators]. Psikhologo-pedagogicheskiy zhurnal «Gaudeamus» [Psychological and Pedagogical Journal "Gaudeamus"], 2024, vol. 23, no. 3, pp. 38-47, DOI: 10.20310/1810-231X-2024-23-3-38-47..
4. Sychev O.A. Rezul'taty YeGE i motivatsiya kak prediktory dolgosrochnoy uspeyayemosti studentov pedagogicheskogo vuza [USE results and motivation as predictors of long-term academic performance of pedagogical university students]. Psikhologicheskoye zdorov'ye i psikhologicheskaya kul'tura v sovremennom rossiyskom obrazovanii: materialy VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Psychological health and psychological culture in modern Russian education: proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference], 2015, pp. 175-178.
5. Nurieva L.M. Analiz svyazi rezul'tatov YeGE s akademicheskoy uspeyayemost'yu studentov-pervokursnikov [Analysis of the connection between the results of the Unified State Exam and the academic performance of first-year students]. Poznaniye i deyatel'nost': ot proshlogo k nastoyashchemu: materialy II Vserossiyskoy mezhdistsiplinarnoy nauchnoy konferentsii [Cognition and Activity: From Past to Present: proceedings of the II All-Russian Interdisciplinary Scientific Conference]. Omsk, 2020, pp. 171-175.
6. Shchegoleva L.V., Surovtsova T.G. Rezul'taty YeGE i uspeyayemost' studentov pervogo kursa [Unified State Exam results and academic performance of first-year students]. Nepreryvnoye obrazovaniye: XXI vek [Lifelong Education: The 21st Century], 2015, no. 4 (12), pp. 33-41.
7. Oskin A.F., Oskin D.A. Primeneniye intellektual'nogo analiza obrazovatel'nykh dannykh dlya prognozirovaniya uspeshnosti uchebnoy deyatel'nosti [Application of educational data mining for predicting academic success]. Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya S. Fundamental'nyye nauki [Bulletin of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences], 2016, no. 4. Available at: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/17089/5/8-12.pdf> (accessed: 08.20.2025).
8. Duk V., Samoylenko A. Data Mining: uchebnyy kurs [Data Mining: Training Course]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2001, 368 p.
9. Paklin N.B., Oreshkov V.I. Biznes-analitika: ot dannykh k znaniyam [Business Analytics: From Data to Knowledge]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2013, 704 p.
10. Agaev F.T., Mamedova G.A., Melikova R.T. Prognozirovaniye uspeyayemosti studentov v elektronnom obrazovanii s ispol'zovaniyem metodov data mining [Predicting student performance in e-learning using data

- mining methods]. Available at: <https://bik.sfu-kras.ru/ft/LIB2/ELIB/b74/free/i-489634964.pdf> (accessed: 08.20.2025).
11. Orange: Opisaniye, Funktsii i Interfeys [Orange: Description, Functions and Interface]. Soware, 2025. Available at: <https://soware.ru/products/orange> (accessed: 08.21.2025).
 12. Tushnyakov V.N. Intellektual'nyy analiz marketingovoy deyatel'nosti na osnove primeneniya instrumentov Orange data mining [Intelligent analysis of marketing activities based on the use of Orange data mining tools]. Vestnik Taganrogskego instituta imeni A.P. Chekhova [Bulletin of the Taganrog Institute named after A.P. Chekhov], 2024, no. 2, pp. 103-107.
 13. Yusupov N., Saveleva A., Leonova O.G. Issledovaniye metodov klassifikatsii v programme Orange [Research of classification methods in the Orange program]. Molodezhnaya shkola-seminar po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh imeni A.A. Vavilova [A.A. Vavilov Youth School-Seminar on Control Problems in Technical Systems], 2020, vol. 1, pp. 27-30.
 14. Yusupov N. Issledovaniye metodov klasterizatsii v programme Orange [Research of clustering methods in the Orange program]. Molodezhnaya shkola-seminar po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh imeni A.A. Vavilova [A.A. Vavilov Youth School-Seminar on Control Problems in Technical Systems], 2020, vol. 1, pp. 35-37.
 15. Kitaeva O.I. Intellektual'nyy analiz obrazovatel'nykh dannykh uchebnoy distsipliny s ispol'zovaniyem programmy Orange [Intellectual analysis of educational data of an academic discipline using the Orange program]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2023, no. 1(29), pp. 190-200. DOI: 10.25729/ESI.2023.29.1.016.

Kitaeva Olga Igorevna. Senior Lecturer at the Institute of Information Technology and Data Analysis at Irkutsk National Research Technical University, Head of the Student Affairs Department. Her research interests include intelligent analysis of educational data. AuthorID: 688343, SPIN: 6638-7790.

Статья поступила в редакцию 28.08.2025; одобрена после рецензирования 17.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 08/28/2025; approved after reviewing 11/17/2025; accepted for publication 12/02/2025.

Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике

УДК 621.311: 621.331

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.006

Моделирование электромагнитных полей на трассах линий электропередачи, оснащенных тросовыми экранами

Крюков Андрей Васильевич, Середкин Дмитрий Александрович,
Воронина Екатерина Викторовна

Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск, *and_kryukov@mail.ru*

Аннотация. Активное расширение границ современных городов и развитие энергетической инфраструктуры приводят к сближению жилых и общественных зданий с трассами воздушных линий электропередачи (ЛЭП) сверхвысокого напряжения. Такие линии являются источниками электромагнитных полей (ЭМП) промышленной частоты повышенной интенсивности, которые создают угрозу для здоровья населения, могут вызывать сбои в работе чувствительного электронного оборудования и оказывают негативное воздействие на окружающую среду. В связи с этим задача обеспечения электромагнитной безопасности (ЭМБ) приобретает особую актуальность. Для снижения напряженностей ЭМП и обеспечения достаточных уровней ЭМБ используются следующие мероприятия: перевод ЛЭП на более низкое напряжение, замена воздушных линий на кабельные, монтаж тросовых экранов и др. В современных условиях выбор технически обоснованных решений должен базироваться на результатах детального компьютерного моделирования, учитывающего реальные режимы работы электроэнергетических систем (ЭЭС). В статье приведены результаты исследований, направленных на разработку моделей ЭЭС, в состав которых входили ЛЭП, оснащенные тросовыми экранами (ТЭ). Отличительной особенностью предложенного подхода является комплексный учет факторов, игнорируемых при упрощенных расчетах, таких, как: несимметрия токов и напряжений, наличие высших гармоник, вносимых нелинейными нагрузками (в частности, выпрямительными электровозами), а также динамика изменения нагрузок. Моделирование выполнено для схемы с ЛЭП 500 кВ, один из участков которой оснащался экранами по трем вариантам: применение пассивных ТЭ (ПТЭ), монтаж активных ТЭ (АТЭ) и совместное использование ПТЭ и АТЭ. Для оценки эффективности применения ТЭ реализована модель ЭЭС с типовой ЛЭП, не оборудованной экранами. Результаты моделирования показали, что при совместной установке ПТЭ и АТЭ наблюдается наибольшее снижение напряженностей электрического (до 60 %) и магнитного поля (до 36 %). Полученные результаты могут использоваться на практике для выбора мероприятий по улучшению условий ЭМБ вблизи трасс высоковольтных ЛЭП.

Ключевые слова: линии электропередачи, электромагнитные поля, экранирование

Цитирование: Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей на трассах линий электропередачи, оснащенных тросовыми экранами / А.В. Крюков, Д.А. Середкин, Е.В. Воронина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 79-90. – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.006.

Введение. Воздушные линии (ВЛ) электропередачи высокого напряжения являются источниками повышенных электромагнитных полей (ЭМП), напряженность которых в границах охранных зон может превышать допустимые нормы [1]. Расширение городов и развитие инфраструктуры приводят к ситуации, когда жилая застройка приближается к трассам существующих ЛЭП [2, 3]. Воздействие ЭМП с повышенными уровнями напряженностей на население и окружающую среду может приводить к негативным последствиям [4]. Кроме того, интенсивные ЭМП являются причиной сбоев в работе электронных устройств [5], а смежные ЛЭП и протяженные металлические сооружения, расположенные вблизи трассы ЛЭП, подвергаются воздействию наведенных напряжений [6-8]. В этих условиях особую актуальность приобретает задача обеспечения ЭМБ на основе применения средств защиты [9-16]. Для снижения напряженностей могут применяться

следующие мероприятия: перенос трасс, перевод ЛЭП на более низкое напряжение, замена ВЛ на кабельные линии, экранирование и другие.

В условиях цифрового перехода в энергетике выбор организационных и технических мероприятий, направленных на улучшение условий электромагнитной безопасности (ЭМБ), должен осуществляться на основе компьютерного моделирования. Подходы к моделированию ЭМП высоковольтных ЛЭП описаны в [17-20]. Результаты численного определения помех, создаваемых ЭМП ЛЭП, приведены в [17, 18]. Алгоритм точного расчета магнитного поля ЛЭП предложен в [19]. Метод определения трехмерных ЭМП ЛЭП описан в [20]. Модели для оценки влияния характеристик ЛЭП на ЭМП рассмотрены в [21].

Ниже представлены результаты исследований, направленных на разработку уточненных моделей для определения ЭМП на трассе ЛЭП 500 кВ, один из участков которой был оснащен тросовыми экранами. Отличительные особенности представленных ниже моделей состояли в учете несимметрии, высших гармоник токов и напряжений, а также динамики изменения нагрузок. Кроме того, использовалась концепция сверхпроводящей плоскости для определения напряженностей магнитного поля. Несимметрия и гармонические искажения создавались тяговыми подстанциями (ТП), питающими участок электрифицированной железной дороги переменного тока. Для моделирования ЭМП использовались методы и алгоритмы, описанные в [22–25] и реализованные в программном комплексе Fazonord AC-DC.

1. Исходные данные моделирования. Для проведения расчетов была разработана уточненная модель для схемы ЭЭС, содержащей следующие элементы: ЛЭП 220 и 500 кВ (рис. 1), тяговую сеть, трансформаторы и автотрансформаторы.



Рис. 1. ЛЭП 500 кВ

Схема моделируемой ЭЭС показана на рис. 2.

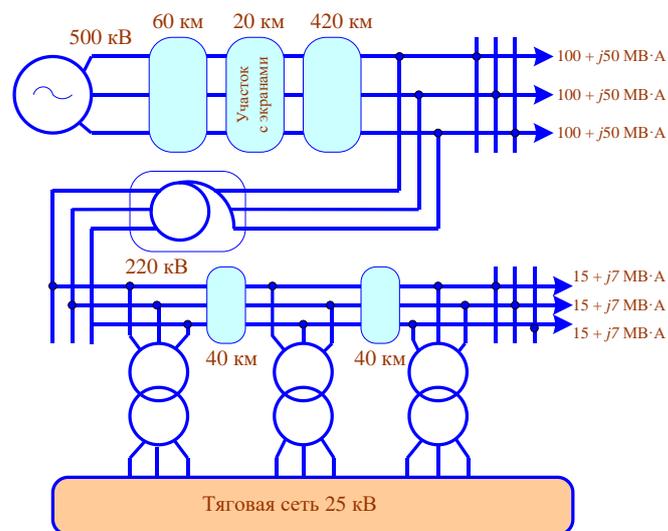


Рис. 2. Схема моделируемой ЭЭС

График движения грузовых составов приведен на рис. 3, а зависимости токов электровозов от пикетов железнодорожного пути – на рис. 4.

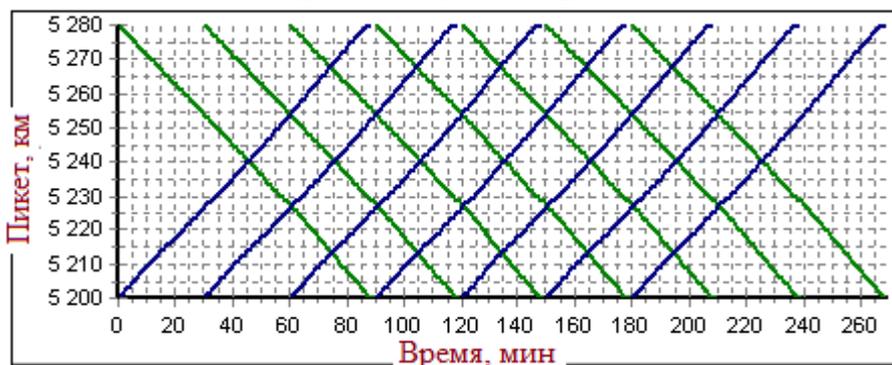


Рис. 3. График движения

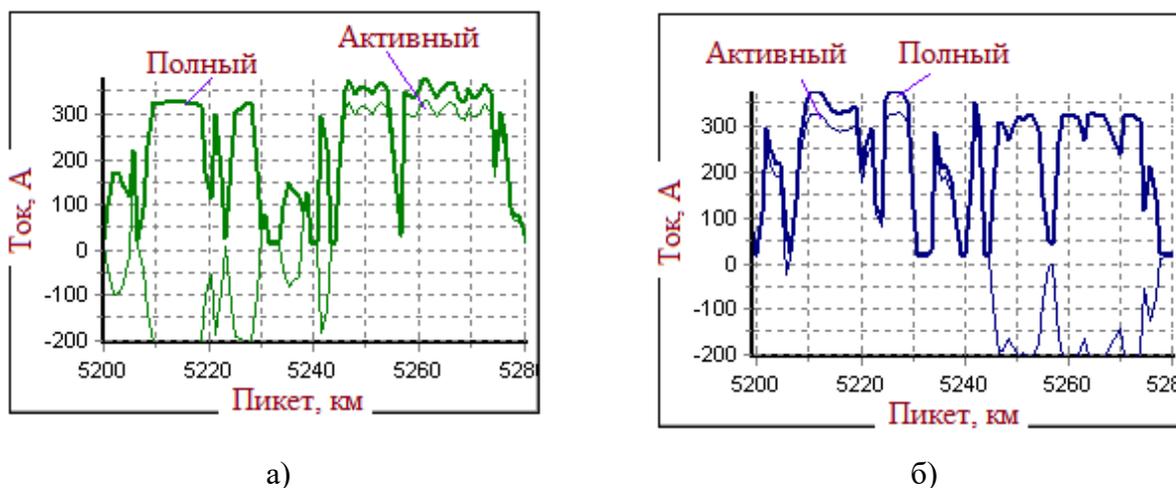


Рис. 4. Зависимости токов электровозов от пикетов:

а – нечетный поезд массой 3192 т; б – четный той же массы

На участке 2 ЛЭП 500 предполагалась установка тросовых экранов в виде дополнительных проводов, подвешиваемых на опоры линии. Моделирование проводилось для следующих вариантов: наличие пассивных ТЭ; установка активных ТЭ; совместное использование активных и пассивных ТЭ; отсутствие ТЭ.

Координаты токоведущих частей и экранов представлены на рис. 5.



Рис. 5. Координаты токоведущих частей и экранов

Схемы соединения токоведущих частей ТЭ с обозначением координат проводов ТЭ показаны на рис. 6.

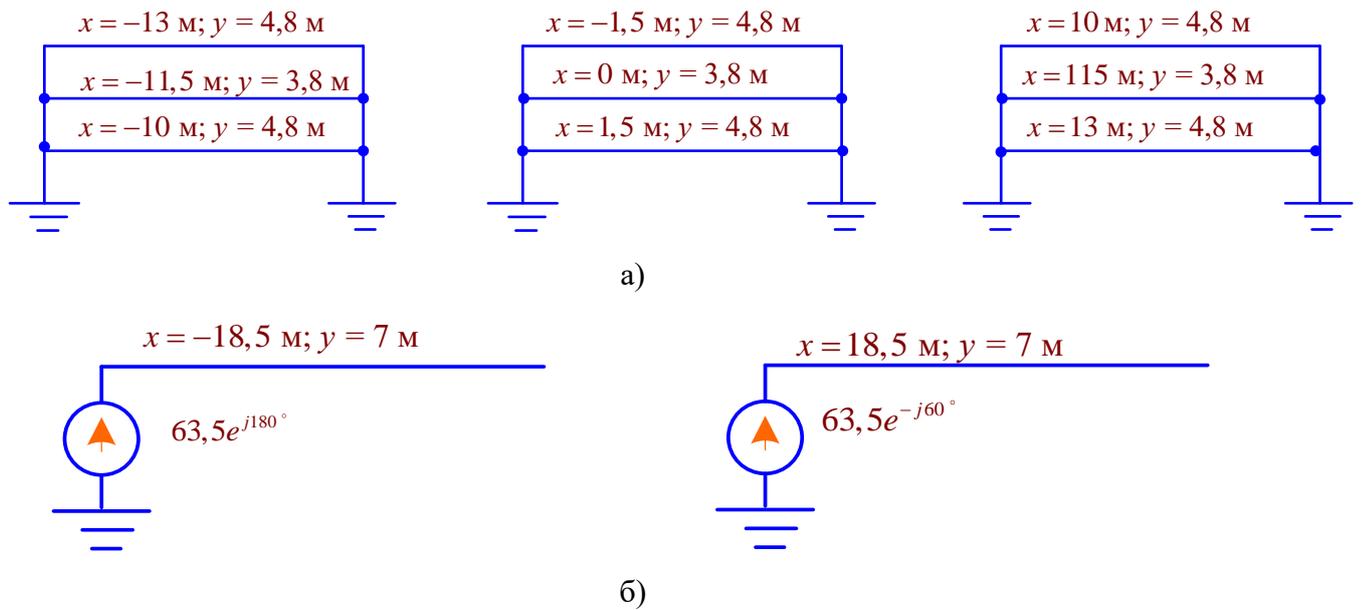


Рис. 6. Схемы соединения токоведущих частей ТЭ: а – пассивные ТЭ; б – активные ТЭ

2. Результаты и обсуждение. Результаты моделирования представлены на рис. 7 –13. На рис. 7 показаны графики зависимостей коэффициентов гармоник тока и напряжения от времени на отправном конце участка ЛЭП 500 кВ, оснащенного экранами, для ситуации совместного использования активных и пассивных ТЭ. Аналогичные зависимости эффективных значений токов и напряжений приведены на рис. 8.

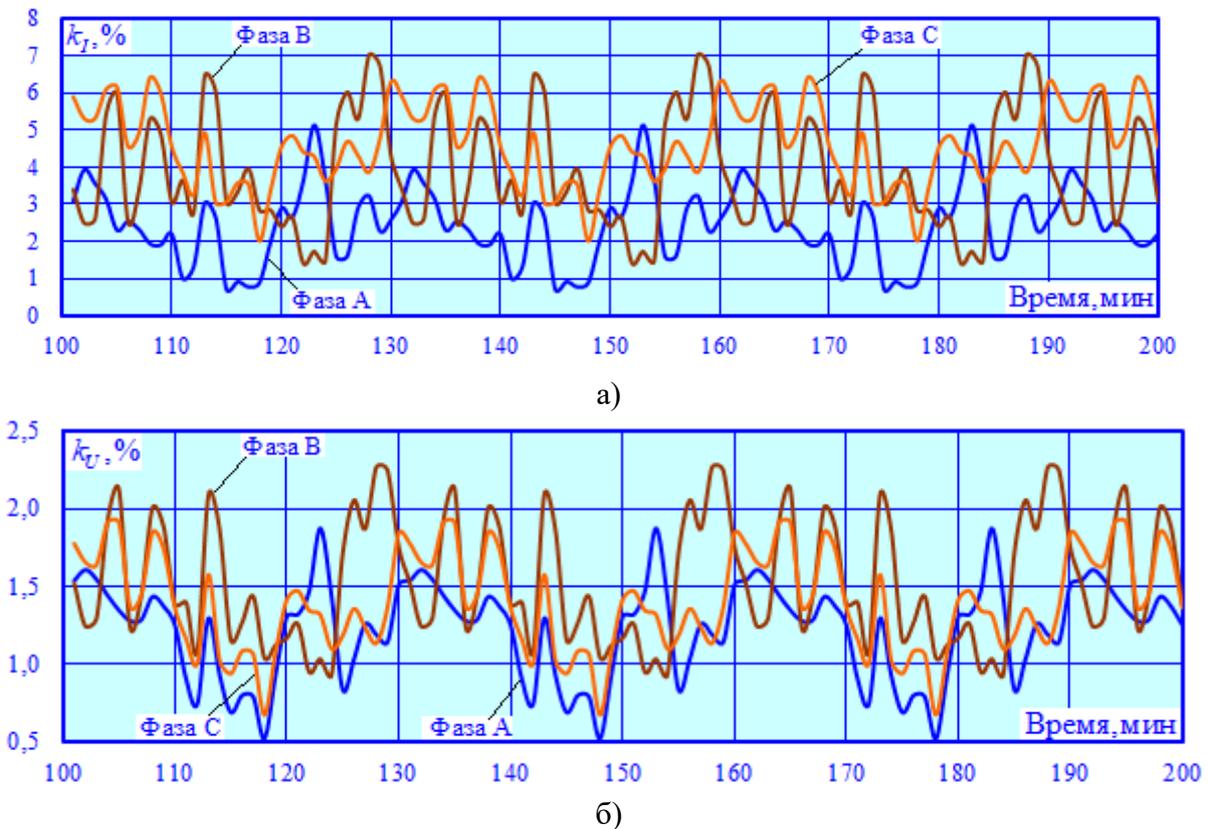


Рис. 7. Графики зависимостей коэффициентов гармоник тока (а) и напряжения (б) от времени

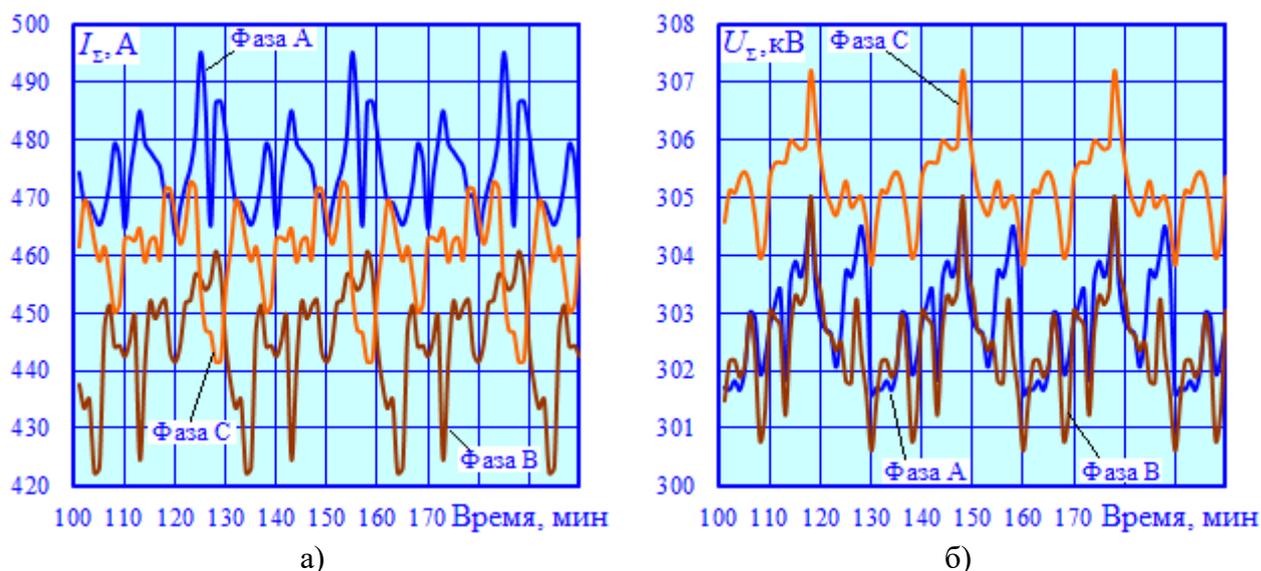


Рис. 8. Графики зависимостей эффективных токов $I = I(t)$ (а) и напряжений $U = U(t)$ (б):

$$I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100}\right)^2}; \quad U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100}\right)^2}; \quad I_1, U_1 - \text{ток и напряжение на основной частоте}$$

На рис. 9 приведен график зависимости $k_{2U} = k_{2U}(t)$ коэффициента несимметрии по обратной последовательности от времени, из которого видно, что уровни несимметрии не превышают допустимых значений.

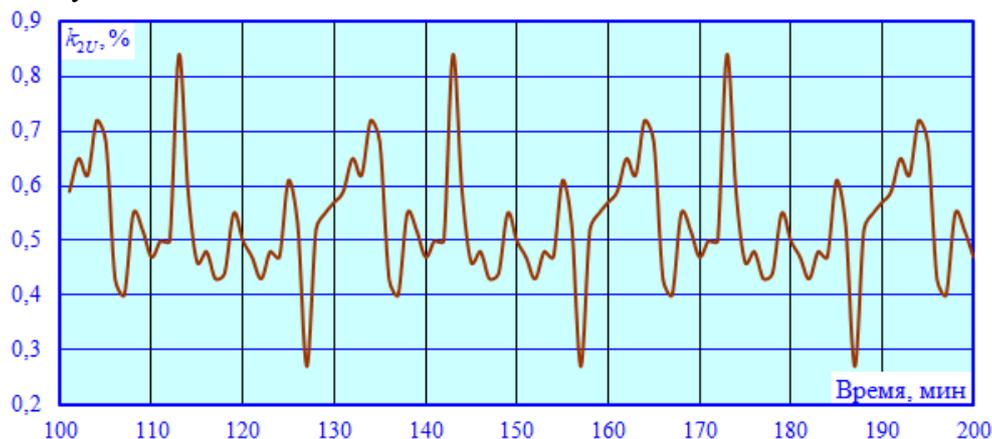


Рис. 9. Графики зависимости $k_{2U} = k_{2U}(t)$

Значения суммарных коэффициентов гармоник на отправном конце участка 2 ЛЭП 500 кВ приведены на рис. 7 и в таблице 1, из которых видно, что уровни несинусоидальности не превышают допустимых значений.

Таблица 1. Максимальные и средние величины суммарных коэффициентов гармоник напряжения

Место определения k_U	Фаза	Ср. значение	Максимум
ЛЭП 500, участок 2	А	1,22	1,87
	В	1,53	2,27
	С	1,4	1,91

Результаты определения токов, протекающих по проводам ПТЭ в режиме совместного использования АТЭ и ПТЭ, приведены на рис. 10. Из него видно, что по проводам пассивных экранов протекают токи, значения которых лежат в диапазоне 26...58 А.

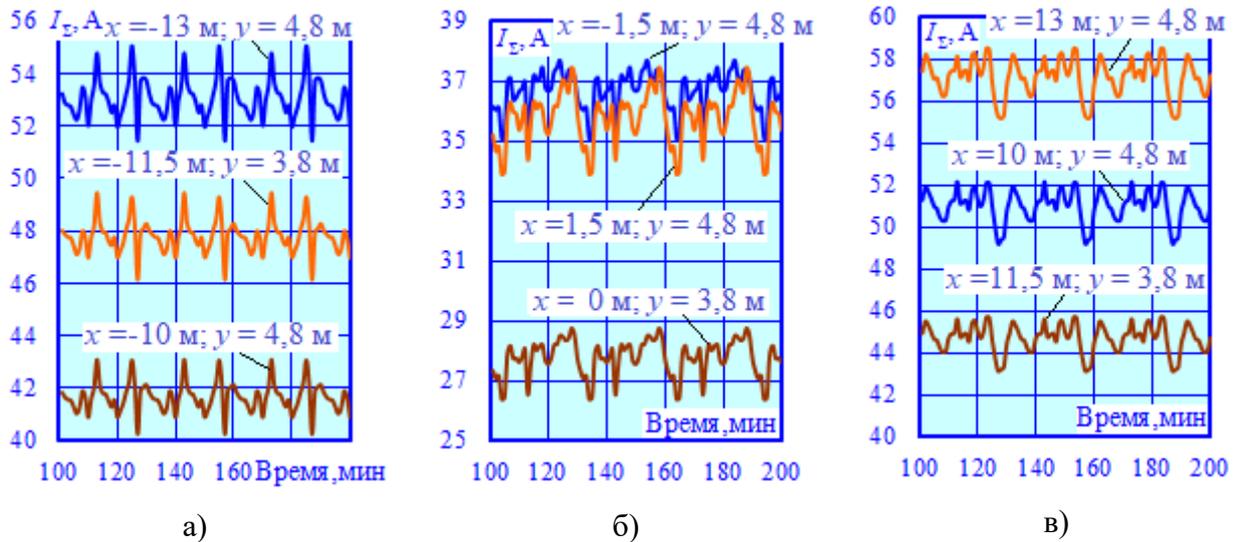


Рис. 10. Зависимости эффективных токов ПТЭ от времени: для каждой кривой указаны координаты x, y проводов, которым они соответствуют

Динамика изменений амплитуд напряженностей ЭМП, создаваемых ЛЭП 500 кВ на отправном конце участка 2, вычисленные в точках с координатами $x = 0; y = 1,8$ м и $x = 11$ м; $y = 1,8$ м, проиллюстрирована на рис. 11 для ситуации совместного использования ПТЭ и АТЭ. Результаты получены с учетом влияния высших гармоник.

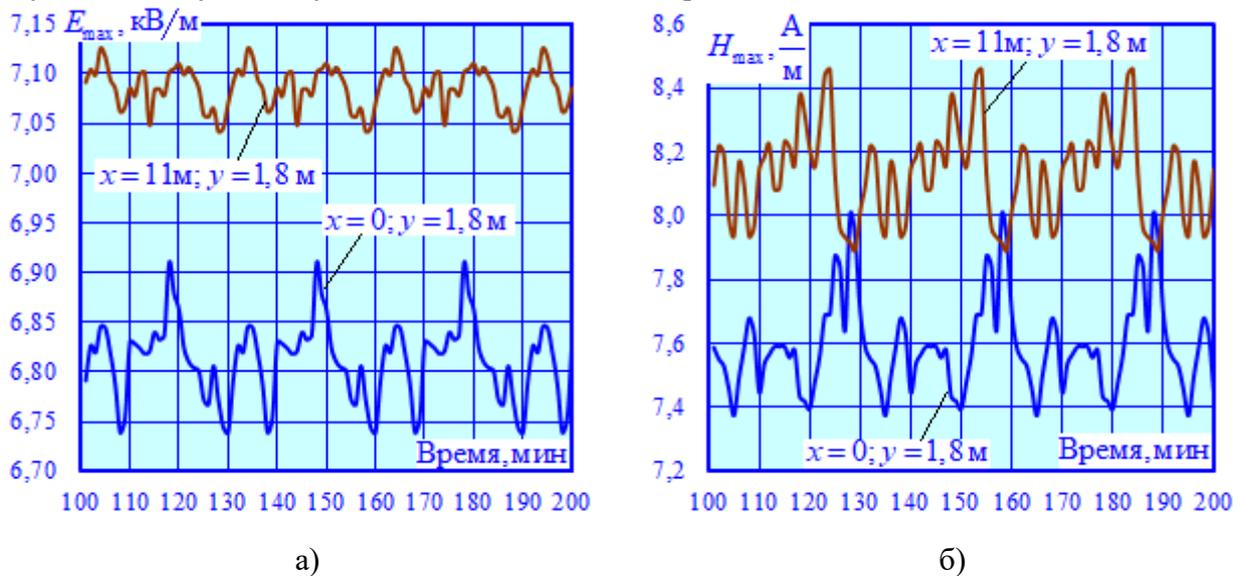


Рис. 11. Зависимости максимумов амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей от времени

По результатам моделирования построены зависимости максимальных и средних значений амплитуд напряженностей ЭМП от координаты x оси, проходящей перпендикулярно трассе ЛЭП, рис. 12. Зависимости $\delta E_{\max}^{(k)} = \delta E_{\max}^{(k)}(x); \delta H_{\max}^{(k)} = \delta H_{\max}^{(k)}(x)$, характеризующие уровни снижения ЭМП при наличии тросовых экранов показаны на рис. 13.

$$\text{Здесь } \delta E_{\max}^{(k)} = \frac{\max(E_{\max}^{(k)})}{\max(E_{\max}^{(\text{без ТЭ})})}; \delta H_{\max}^{(k)} = \frac{\max(H_{\max}^{(k)})}{\max(H_{\max}^{(\text{без ТЭ})})}; k \rightarrow \text{ПТЭ, АТЭ, АТЭ + ПТЭ}.$$

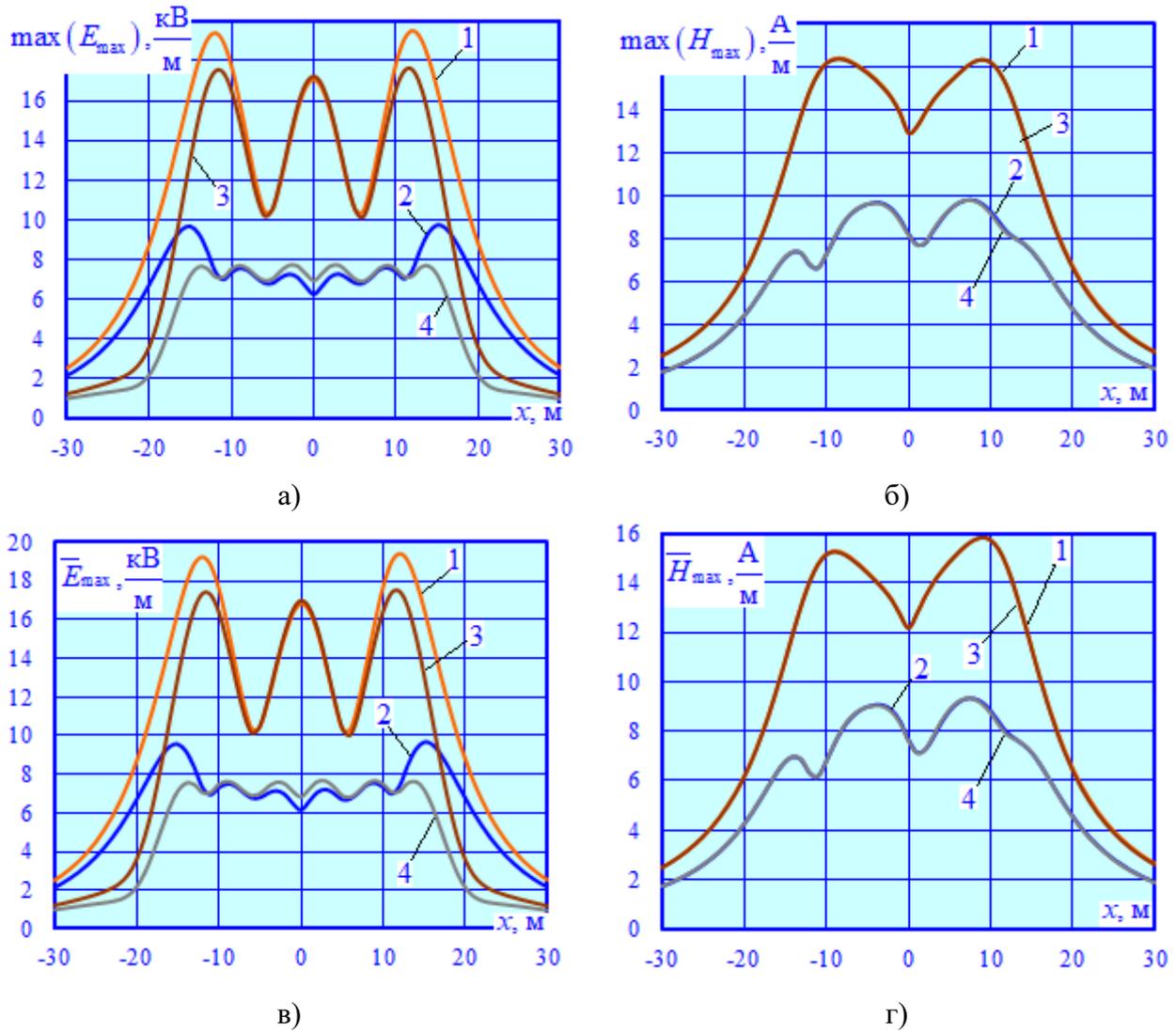


Рис. 12. Зависимости максимумов (а, б) и средних значений (в, г) амплитуд напряженностей электрического (а, в) и магнитного (б, г) полей от координаты x :
1 – без ТЭ; 2 – ПТЭ; 3– АТЭ; 4 – АТЭ + ПТЭ

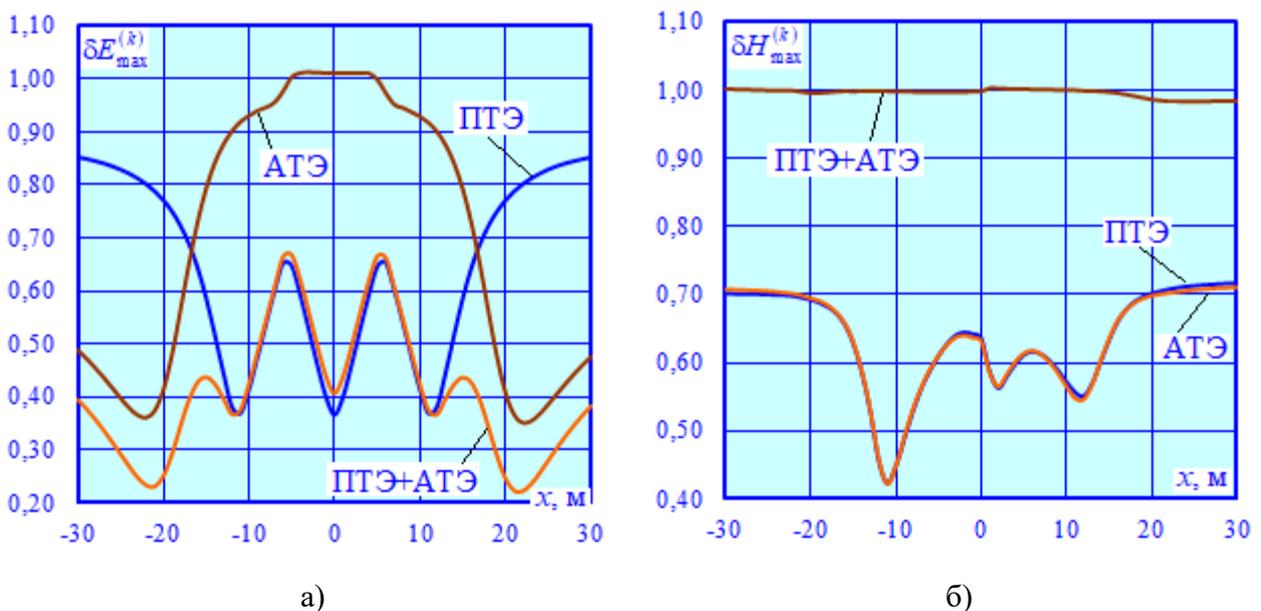


Рис. 13. Зависимости $\delta E_{\max}^{(k)} = \delta E_{\max}^{(k)}(x)$; $\delta H_{\max}^{(k)} = \delta H_{\max}^{(k)}(x)$

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

- уровни снижения напряженностей ЭМП нелинейно зависят от координаты x ;
- при установке пассивных тросовых экранов средняя величина уменьшения напряженностей ЭП и МП составляет 36 %;
- при наличии АТЭ напряженности ЭП снижаются в среднем на 30 %; так как по проводам АТЭ протекают небольшие емкостные токи в 4,6 А; эти элементы практически не влияют на напряженности МП (рис. 12 б);
- при совместном использовании ПТЭ и АТЭ напряженности ЭП уменьшаются на 60 % и существенно снижается площадь территории с большими уровнями напряженности ЭП; напряженности МП для этой ситуации ослабевают на 36 %.

Таким образом, применение тросовых экранов позволяет заметно улучшить условия электромагнитной безопасности и экологии.

Заключение. Выполненные исследования подтвердили, что применение тросовых экранов является высокоэффективным средством снижения напряженностей электромагнитных полей, создаваемых воздушными линиями электропередачи сверхвысокого напряжения. Разработанные уточненные модели, реализованные в программном комплексе *Fazonord*, позволили оценить эффективность экранирования в условиях, максимально приближенных к реальным, за счет учета несимметрии токов и напряжений, несинусоидальности режимов, а также динамики изменения нагрузок во времени. Установлено, что для рассматриваемых режимов уровни несимметрии и коэффициенты гармонических искажения не превышают нормативно допустимых значений. Наибольший эффект снижения уровней ЭМП достигается при комбинированном использовании активных и пассивных тросовых экранов. Уменьшение значений напряженности электрического поля при совместном использовании АТЭ и ПТЭ составило 60 %, аналогичный показатель для магнитного поля равен 36 %; при этом существенно сокращается ширина зоны с превышением предельно допустимых уровней ЭМП, что улучшает условия электромагнитной безопасности и экологическую обстановку на прилегающих территориях. Предлагаемый подход носит универсальный характер и может быть применен для линий электропередачи различных классов напряжения и конструктивного исполнения. На его основе возможны выбор рационального расположения токоведущих частей экранов и оптимизация применяемых средств защиты с учетом реальных условий трассы ЛЭП.

Благодарности. Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00937).

Список источников

1. Environmental Health Criteria 238: extremely low frequency fields. Geneva, WHO Press, 2007, 543 p.
2. Houicher S.-E., Djekidel R., Bessedik S.A. Calculation and mitigation of the magnetic field under high voltage overhead transmission line. 2022 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Sétif, 2022, pp. 1825-1830, DOI: 10.1109/SSD54932.2022.9955500.
3. Sadiya U., Nasiru R. Analysis of radiofrequency radiation exposure from power transmission lines within sokoto metropolis. Journal of Science Research and Reviews, 2025, vol. 2, no. 2, pp. 70-75, DOI: 10.70882/josrar.2025.v2i2.71.
4. Awafung E.A., Fina O. F., Awafung V.I. The Measurements and impacts of electromagnetic field on the psychological and physiological well-being of humans. Newport International Journal of Biological and Applied Sciences, 2025, vol. 6, no. 1, pp. 21-31, DOI: 10.59298/NIJBAS/2025/6.1.213100.
5. Gizatullin Z., Nuriev M., Gizatullin R.M. Physical simulation of electromagnetic interference in electronic mains under the effect of electromagnetic fields of high-voltage power lines. Russian Electrical Engineering, 2018, vol. 89, no. 5, pp. 328-331, DOI: 10.3103/S1068371218050036.

6. Shen M., Shah S., Eftekhari R. Study of electromagnetic interference on distribution conductors from parallel transmission line and practical mitigation solutions. 2014 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition (T&D), Chicago, 2014, DOI: 10.1109/TDC.2014.6863407.
7. Hussein H., Ahmed A.S., Mousa S. et al. Impact and mitigation of electromagnetic interference between HVTL and pipelines. SoutheastCon 2023, Orlando, 2023, pp. 485-489, DOI: 10.1109/SoutheastCon51012.2023.10115180
8. Lu D., Liu C., Qi L. et al. Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipeline near overhead ac transmission line. 2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications, Dalian, 2012, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICEF.2012.6310384.
9. Мисриханов М.Ш. Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов: монография / М.Ш. Мисриханов, Н.Б. Рубцова, А.Ю. Токарский. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 508 с.
10. Grbic M. Levels of electromagnetic fields in the vicinity of transmission power lines and facilities and mitigation techniques. Tesla Innovation Days (2024, Belgrade), Belgrade, 2024, DOI: 10.5937/TID24046G.
11. M. Rebolini, M. Forteleoni, D. Capra. Passive cancellation loops: Case study, model simulation and field test on a real HV overhead line in Italy: Electromagnetic computation and optimization. 2017 AEIT International Annual Conference, Cagliari, 2017, pp. 1-6, DOI: 10.23919/AEIT.2017.8240502.
12. Canova A., Giaccone L. Magnetic field mitigation of power cable by high magnetic coupling passive loop. CIRED 2009 – The 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution – Part 2, Prague, 2009, pp. 1–15, DOI:10.1049/cp.2009.0592.
13. Munteanu C., Merdan E., Topa V. et al. Power frequency magnetic field mitigation nearby power lines using rectangular frames. Environmental Engineering and Management Journal, 2013, vol. 12, no. 6, pp. 1137-1143, DOI: 10.30638/eemj.2013.140.
14. Grinchenko V., Tkachenko O.O. Mitigation of overhead line magnetic field by grid electromagnetic shield. Technical Electrodynamics, 2020, no. 5, pp. 5-9, DOI: 10.15407/techned2020.05.005.
15. Vilachá C., Otero A. F., Moreira J. C. et al. EMF mitigation in the vicinity of a overhead power line. 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice, 2012, pp. 308-312, DOI: 10.1109/EEEIC.2012.6221393.
16. Dein A.Z.E., Gouda O.E., Lehtonen M. et al. Mitigation of the electric and magnetic fields of 500-kv overhead transmission lines. IEEE Access, 2022, vol. 10, pp. 33900-33908, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3161932.
17. Cristofolini A., Popoli A., Sandrolini L. Numerical modelling of interference from ac power lines on buried metallic pipelines in presence of mitigation wires. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, 2018, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493677.
18. Alameri B.M. Electromagnetic Interference (EMI) produced by high voltage transmission lines. EUREKA Physics and Engineering, 2020, vol. 5, no. 5, pp. 43-50.
19. Djekidel R., Bessedik S.A., Akef S. Accurate computation of magnetic induction generated by HV overhead power lines. FACTA UNIVERSITATIS Series Electronics and Energetics, 2019, vol. 32, no. 2, pp. 267–285, DOI: 10.2298/FUEE1902267R
20. Modric T., Vujević S., Lovric D. 3D Computation of the power lines magnetic field. Progress In Electromagnetics Research M, 2015, vol. 41, pp. 1-9, DOI: 10.2528/PIERM14122301.
21. Ioan I. A. The Impact of three-phase high voltage overhead powerlines characteristics on electromagnetic field interference. 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, 2023, pp. 01-05, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187528.
22. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 273 с.
23. Буякова Н.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление / Н.В. Буякова, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков; под общ. ред. А.В. Крюкова. – Ангарск: Изд-во АГТА, 2018. – 382 с.
24. Буякова Н.В. Учет гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи, питающими тяговые подстанции железных дорог / Н.В. Буякова, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков и др. // Электричество. – 2022. – № 5. – С. 28–38.
25. Buyakova N.V., Kryukov A.V., Seregin D.A. et al. Computer models in problems of ensuring electromagnetic safety. E3S Web of Conferences, 2020, vol. 216, no. 3, DOI: 10.1051/e3sconf/202021601062.

Крюков Андрей Васильевич. Доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения. Author ID: 238950, SPIN: 7500-5781, ORCID: 0000-0001-6543-1790. and_kryukov@mail.ru, 664074, Россия, Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Середкин Дмитрий Александрович. Кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения. Author ID: 1045505, SPIN: 9366-3331, ORCID: 0000-0001-5628-2252, dmitriy987@mail.ru, 664074, Россия, Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Воронина Екатерина Викторовна. Аспирант кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения. Author ID: 1175580, SPIN: 3271-7313, ORCID: 0009-0008-4399-6086, eka7erina.voronina@yandex.ru, 664074, Россия, Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

UDC 621.311: 621.331

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.006

Modeling of electromagnetic fields on power transmission line routes equipped with shield wires

Andrey V. Kryukov, Dmitry A. Seredkin, Ekaterina V. Voronina

Irkutsk state transport university, Russia, Irkutsk, and_kryukov@mail.ru

Abstract. The rapid expansion of modern cities and the development of energy infrastructure are bringing residential and public buildings closer to ultra-high-voltage overhead power lines. These lines emit high-intensity industrial-frequency electromagnetic fields (EMF), which pose a health hazard to the public, can cause malfunctions in sensitive electronic equipment, and have a negative impact on the environment. Therefore, ensuring electromagnetic safety is particularly important. To reduce EMF intensity and ensure adequate levels of electromagnetic safety, the following measures are used: converting power lines to lower voltage, replacing overhead lines with cables, installing cable screens, etc. In today's environment, the selection of technically sound solutions should be based on the results of detailed computer modeling, taking into account the actual operating modes of electric power systems. This article presents the results of research aimed at developing models of electric power systems that included power lines equipped with cable screens. A distinctive feature of the proposed approach is its comprehensive consideration of factors ignored in simplified calculations, such as current and voltage asymmetry, the presence of higher harmonics introduced by nonlinear loads (in particular, rectifier electric locomotives), and the dynamics of load changes. The simulation was performed for a 500 kV transmission line, one section of which was equipped with shields using three options: the use of passive cable shields, the installation of active cable shields, and the combined use of active and passive shielding. To evaluate the effectiveness of cable shields, a model of an electrical network with a typical transmission line without shields was implemented. The simulation results showed that the combined installation of active and passive shields resulted in the greatest reduction in electric (up to 60%) and magnetic field (up to 36%) strengths. The obtained results can be used in practice to select measures to improve electromagnetic safety conditions near high-voltage transmission lines.

Keywords: power lines, electromagnetic fields, shielding

Acknowledgments: This research was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 25-29-00937).

References

1. Environmental Health Criteria 238: extremely low frequency fields. Geneva, WHO Press, 2007, 543 p.
2. Houicher S.-E., Djekidel R., Bessedik S.A. Calculation and mitigation of the magnetic field under high voltage overhead transmission line. 2022 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Sétif, 2022, pp. 1825-1830, DOI: 10.1109/SSD54932.2022.9955500.
3. Sadiya U., Nasiru R. Analysis of radiofrequency radiation exposure from power transmission lines within sokoto metropolis. Journal of Science Research and Reviews, 2025, vol. 2, no. 2, pp. 70-75, DOI: 10.70882/josrar.2025.v2i2.71.
4. Awafung E.A., Fina O. F., Awafung V.I. The Measurements and impacts of electromagnetic field on the psychological and physiological well-being of humans. Newport International Journal of Biological and Applied Sciences, 2025, vol. 6, no. 1, pp. 21-31, DOI: 10.59298/NIJBAS/2025/6.1.213100.
5. Gizatullin Z., Nuriev M., Gizatullin R.M. Physical simulation of electromagnetic interference in electronic mains under the effect of electromagnetic fields of high-voltage power lines. Russian Electrical Engineering, 2018, vol. 89, no. 5, pp. 328-331, DOI: 10.3103/S1068371218050036.

6. Shen M., Shah S., Eftekhari R. Study of electromagnetic interference on distribution conductors from parallel transmission line and practical mitigation solutions. 2014 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition (T&D), Chicago, 2014, DOI: 10.1109/TDC.2014.6863407.
7. Hussein H., Ahmed A.S., Mousa S. et al. Impact and mitigation of electromagnetic interference between HVTL and pipelines. SoutheastCon 2023, Orlando, 2023, pp. 485-489, DOI: 10.1109/SoutheastCon51012.2023.10115180
8. Lu D., Liu C., Qi L. et al. Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipeline near overhead ac transmission line. 2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications, Dalian, 2012, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICEF.2012.6310384.
9. Misrikhanov M.Sh. Ensuring electromagnetic safety of power grid facilities: monograph / M.Sh. Misrikhanov, N.B. Rubtsova, A.Yu. Tokarsky. - Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2019. - 508 p.
10. Grbic M. Levels of electromagnetic fields in the vicinity of transmission power lines and facilities and mitigation techniques. Tesla Innovation Days (2024, Belgrade), Belgrade, 2024, DOI: 10.5937/TID24046G.
11. M. Rebolini, M. Forteleoni, D. Capra. Passive cancellation loops: Case study, model simulation and field test on a real HV overhead line in Italy: Electromagnetic computation and optimization. 2017 AEIT International Annual Conference, Cagliari, 2017, pp. 1-6, DOI: 10.23919/AEIT.2017.8240502.
12. Canova A., Giaccone L. Magnetic field mitigation of power cable by high magnetic coupling passive loop. CIRED 2009 – The 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution – Part 2, Prague, 2009, pp. 1–15, DOI:10.1049/cp.2009.0592.
13. Munteanu C., Merdan E., Topa V. et al. Power frequency magnetic field mitigation nearby power lines using rectangular frames. Environmental Engineering and Management Journal, 2013, vol. 12, no. 6, pp. 1137-1143, DOI: 10.30638/eemj.2013.140.
14. Grinchenko V., Tkachenko O.O. Mitigation of overhead line magnetic field by grid electromagnetic shield. Technical Electrodynamics, 2020, no. 5, pp. 5-9, DOI: 10.15407/techned2020.05.005.
15. Vilachá C., Otero A. F., Moreira J. C. et al. EMF mitigation in the vicinity of a overhead power line. 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice, 2012, pp. 308-312, DOI: 10.1109/EEEIC.2012.6221393.
16. Dein A.Z.E., Gouda O.E., Lehtonen M. et al. Mitigation of the electric and magnetic fields of 500-kv overhead transmission lines. IEEE Access, 2022, vol. 10, pp. 33900-33908, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3161932.
17. Cristofolini A., Popoli A., Sandrolini L. Numerical modelling of interference from ac power lines on buried metallic pipelines in presence of mitigation wires. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, 2018, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493677.
18. Alameri B.M. Electromagnetic Interference (EMI) produced by high voltage transmission lines. EUREKA Physics and Engineering, 2020, vol. 5, no. 5, pp. 43-50.
19. Djekidel R., Bessedik S.A., Akef S. Accurate computation of magnetic induction generated by HV overhead power lines. FACTA UNIVERSITATIS Series Electronics and Energetics, 2019, vol. 32, no. 2, pp. 267–285, DOI: 10.2298/FUEE1902267R
20. Modric T., Vujević S., Lovric D. 3D Computation of the power lines magnetic field. Progress In Electromagnetics Research M, 2015, vol. 41, pp. 1-9, DOI: 10.2528/PIERM14122301.
21. Ioan I. A. The Impact of three-phase high voltage overhead powerlines characteristics on electromagnetic field interference. 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, 2023, pp. 01-05, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187528.
22. Zakarukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonnesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex Unbalanced Modes of Electrical Systems]. Irkutsk, IrGUPS [Irkutsk State Transport University] Publ., 2005, 273 p.
23. Buyakova N.V., Zakarukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog: modelirovaniye i upravleniye [Electromagnetic Safety in Railway Power Supply Systems: Modeling and Management]. Ed. by A.V. Kryukov. Angarsk, AGTA Publishing House, 2018, 382 p.
24. Buyakova N.V., Zakarukin V.P., Kryukov A.V. et al. Uchet garmonicheskikh iskazheniy pri modelirovanii elektromagnitnykh poley, sozdavayemykh liniyami elektroperedachi, pitayushchimi tyagovyvye podstantsii zheleznykh dorog [Accounting for Harmonic Distortions in Modeling Electromagnetic Fields Created by Power Transmission Lines Feeding Railway Traction Substations]. Elektrichestvo [Electricity], 2022, no. 5, pp. 28–38.
25. Buyakova N.V., Kryukov A.V., Seregin D.A. et al. Computer models in problems of ensuring electromagnetic safety. E3S Web of Conferences, 2020, vol. 216, no. 3, DOI: 10.1051/e3sconf/202021601062.

Kryukov Andrey Vasilyevich. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport of the Irkutsk State Transport University. Author ID: 238950, SPIN: 7500-5781, ORCID: 0000-0001-6543-1790. and_kryukov@mail.ru. 664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky St., 15.

Seredkin Dmitriy Aleksandrovich. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering of Transport of the Irkutsk State Transport University. Author ID: 1045505, SPIN: 9366-3331, ORCID: 0000-0001-5628-2252, dmitriy987@mail.ru. 664074, Russia, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15

Voronina Ekaterina Viktorovna. Postgraduate student of the Department of Electric Power Engineering of Transport of Irkutsk State Transport University. Author ID: 1175580, SPIN: 3271-7313, ORCID: 0009-0008-4399-6086, eka7erina.voronina@yandex.ru. 664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky St., 15.

Статья поступила в редакцию 02.10.2025; одобрена после рецензирования 14.10.2025; принята к публикации 12.02.2026.

The article was submitted 10/02/2025; approved after reviewing 10/14/2025; accepted for publication 02/12/2026.

УДК 004.413.4

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.007

Роль задачи оценивания состояния в обеспечении ситуационной осведомленности диспетчера ИЭС

Колосок Ирина Николаевна, Коркина Елена Сергеевна

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *kolosok@isem.irk.ru*

Аннотация. Надежная и отказоустойчивая работа интеллектуальной электроэнергетической системы (ЭЭС) требует мониторинга и управления в режиме реального времени. Как и любая сложная динамическая система, функционирующая в постоянно изменяющихся условиях, ЭЭС нуждается в постоянном мониторинге состояния и диспетчерском управлении, которые осуществляются диспетчерским персоналом. Хотя многие процессы при управлении ЭЭС автоматизированы, в конечном счете, именно диспетчерский персонал поддерживает систему в рабочем состоянии. Ситуационную осведомленность (Situational Awareness – SA) диспетчера ЭЭС можно охарактеризовать, как полную информацию о текущем состоянии энергосистемы. Недостаточный уровень SA диспетчера существенно влияет на вероятность того, что система перейдет в каскадную фазу отключения электроэнергии – это подтверждается многочисленными инцидентами в энергосистемах. Сложность энергосистем постоянно растет, это повышает риск того, что диспетчер не сможет контролировать состояние и управлять сетью в любых ситуациях, если его когнитивные способности не будут подкреплены соответствующими инструментами. К таким инструментам относится процедура оценивания состояния (ОС), которая является важнейшей функцией, обеспечивающей расчет текущего состояния ЭЭС по данным измерений параметров режима в реальном времени.

В статье рассматриваются вопросы использования процедуры ОС для повышения ситуационной осведомленности при диспетчерском управлении интеллектуальными энергосистемами (ИЭС). Сформулированы особенности ИЭС, определяющие актуальность исследований проблемы SA и необходимость развития SA диспетчерского персонала. Рассмотрены рабочие состояния ИЭС и роль диспетчера при возникновении аварийных ситуаций и при проведении восстановительных мероприятий. Рассмотрена роль задачи оценивания состояния в повышении SA диспетчера энергосистемы. Сформулированы требования к процедуре ОС при ее использовании в структуре SA. Выполнен анализ основных источников данных, используемых для решения задачи ОС. Показано, что использование синхронизированных векторных измерений (данных PMU) обеспечивает быструю и гарантированную оценку состояния в режиме реального времени на основе сетевой модели реальной энергосистемы. Представлен разработанный в ИСЭМ СО РАН метод контрольных уравнений для ОС по данным PMU, соответствующий этим требованиям. Показано, что процедура ОС обеспечивает информацией требуемого качества задачи диспетчерского управления и мониторинга ИЭС и является эффективным средством поддержки принятия решений и повышения ситуационной осведомленности диспетчерского персонала ИЭС.

Ключевые слова: интеллектуальная энергосистема, ситуационная осведомленность, оценивание состояния, синхронизированные векторные измерения (данные PMU)

Цитирование: Колосок И.Н. Роль задачи оценивания состояния в обеспечении ситуационной осведомленности диспетчера ИЭС / И.Н. Колосок, Е.С. Коркина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 91-103. – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.007.

Введение. Ситуационная осведомленность (SA – Situational Awareness) – это способность распознавать и понимать ситуацию или окружающую среду, а также способность выявлять и оценивать любые потенциальные угрозы и предпринимать необходимые шаги для их устранения [1]. Термин SA был введен в попытке создать конструкцию процессов принятия решений человеком в сложных динамических системах и определяется как основа для всех решений и действий, принимаемых людьми при функционировании сложных и динамичных систем [2, 3]. С тех пор концепция SA вошла в основное русло исследований человеческого фактора и смежных областей, в которых люди действуют в сложных условиях [4]. Возрастающая сложность современных технических систем, а также задачи контроля их состояния повышают ответственность человека-оператора.

Ситуационная осведомленность играет решающую роль во многих отраслях и областях человеческой деятельности, таких, как обороноспособность, медицина, авиация, ракетно-космическая отрасль. К таким областям, несомненно, относится энергетика.

В России исследования по SA в энергетике проводятся, в основном, в сфере атомной энергетики, энергетической безопасности, интересные результаты получены в исследованиях кибербезопасности и кибер-ситуационной осведомленности энергетических объектов в ИСЭМ СО РАН [5].

Ситуационную осведомленность оператора ЭЭС можно охарактеризовать, как полную информацию о текущем состоянии энергосистемы и всех других объектов, которые могут оказать влияние на ее режимы [6-7]. Это подчеркивает необходимость повышения уровня SA как отдельных лиц, так и команд, осуществляющих диспетчерское управление ЭЭС в нормальных и аварийных режимах.

Сложность энергосистем постоянно растет, что повышает риск того, что люди-операторы не смогут управлять сетью в любых ситуациях, если их когнитивные способности не будут подкреплены соответствующими инструментами. Отсутствие или недостаточный уровень SA оператора существенно влияет на вероятность того, что система переходит в каскадную фазу отключения электроэнергии, и такой переход подтверждается многочисленными инцидентами в энергосистемах.

Расширение возможностей SA оператора ЭЭС означает преодоление когнитивного барьера с помощью соответствующих инструментов и визуализаций. К таким инструментам относится процедура оценивания состояния (ОС), которая является важнейшей функцией, обеспечивающей расчет текущего состояния ЭЭС в реальном времени. В связи с этим в последнее десятилетие за рубежом активно развиваются исследования по применению методов ОС для повышения SA диспетчеров передающих и распределительных сетей ЭЭС [8, 9], также эта проблема является предметом обсуждения на международных конференциях по энергетике, например, [10].

Программа оценки состояния является одним из ключевых приложений в системе энергоменеджмента (EMS). Она служит важным модулем, который проверяет исходные данные измерений, полученные из систем сбора данных, и рассчитывает текущие состояния системы для последующих приложений в EMS. До недавнего времени основным источником информации для ОС были телеизмерения и телесигналы, поступающие от системы SCADA. К недостаткам SCADA-систем, применяемых в энергетике, относятся низкая частота дискретизации (одна выборка за 2-4 секунды) данных SCADA и отсутствие их синхронизации по времени, вследствие чего результаты оценки состояния могут быть ненадежными и отставать от реального состояния системы. Недостовверные результаты ОС оказывают влияние на последующие сетевые и рыночные приложения, и операторы могут потерять правильное представление о состоянии системы в EMS.

Появление устройств нового поколения (PMU – Phasor Measurement Unit, УСВИ в России) для синхронизированных векторных измерений (значений напряжений и токов в линиях) позволяет реализовать алгоритмы статического и динамического линейного оценивания состояния (ЛОС). Статическое ЛОС использует данные PMU для онлайн-мониторинга величины напряжения и для обнаружения недостоверных данных, вызванных ошибками или кибератаками. Динамическое ЛОС отслеживает изменения, используя предварительно откалиброванные модели физических систем и синхронизированные по времени измерения PMU для оценки динамических состояний.

В ИСЭМ СО РАН был разработан метод контрольных уравнений для обнаружения ошибочных данных в SCADA-измерениях и ОС [11], который затем был адаптирован для проверки измерений PMU и реализации линейных алгоритмов ОС [12]. Алгоритмы ЛОС

позволяют получить решение в течение одной итерации. Практическая ценность такого подхода заключается в простоте его реализации и высокой скорости решения задачи.

В статье рассматриваются вопросы применения процедуры ОС для повышения SA диспетчерского персонала при управлении ИЭС. Показано, что синхронизированные измерения тока и напряжения и их производные составляют основу для разработки и функционирования быстродействующих алгоритмов оценивания состояния, способных помочь операторам оценить и диагностировать текущее состояние системы для принятия упреждающих и необходимых корректирующих мер при управлении ИЭС в реальном времени.

1. Ситуационная осведомленность диспетчера ЭЭС

1.1 Особенности современных ЭЭС, определяющие необходимость развития SA диспетчерского персонала. В первую очередь проблема SA была сформулирована и актуализирована в тех областях деятельности человека, где уже применялись технологии поддержки принятия решений и советчика диспетчера, таких, как работа авиадиспетчеров и диспетчерского персонала ЭЭС.

Ситуационная осведомленность диспетчера энергосистемы – это понимание текущей режимной ситуации, оптимизация управления компонентами энергосети, их поведением и производительностью, а также выявление, предотвращение или реагирование на возникающие проблемы в сети до того, как могут возникнуть сбои [13]. В первую очередь это относится к самой энергосистеме и состоянию всех ее элементов, включая шины, линии электропередачи, выключатели, генераторы, трансформаторы и т.д. Во-вторых, сюда входят условия и объекты, которые могут оказать влияние на энергосистему, такие, как суровые погодные условия, пожары, землетрясения, социальные беспорядки и события, вызывающие значительные изменения нагрузки.

Ситуационная осведомленность требует максимально возможного привлечения внимания оператора к этим вопросам. Новые свойства ИЭС и условия их функционирования повышают ответственность диспетчера при управлении энергосистемой и актуальность проблемы SA. К таким свойствам можно отнести следующее:

1. Современные ЭЭС являются кибер-физическими системами (КФС), в которых кибер- и физическая подсистемы влияют друг на друга. Анализ событий в процессе развития ряда системных аварий в различных странах, выполненный в отечественных и зарубежных работах, показал наличие при развитии аварий взаимного влияния отказов и возмущений в технологической и информационно-коммуникационной подсистемах ЭЭС, в результате чего могут возникнуть комбинированные аварийные состояния [14].

2. Основными составляющими современной ЭЭС являются передающие сети высокого напряжения (750-220 кВ) и распределительные сети напряжением 110кВ и ниже. До недавнего времени распределительные сети имели достаточно простую радиальную структуру без источников генерации, мощность передавалась из высоковольтной сети к потребителям всегда в одном направлении, диспетчерское управление такими сетями было достаточно простым, и ему не уделялось особого внимания. В современных условиях распределительная сеть претерпевает значительные изменения, связанные с распространением распределенных энергетических ресурсов, СНЭ, появлением активных потребителей (просьюмеров) и двунаправленных потоков энергии. Это приводит к существенному усложнению функций диспетчерского управления распределительными сетями, при котором ситуационная осведомленность в режиме реального времени играет решающую роль в обеспечении устойчивой и эффективной работы всей энергосистемы.

3. Укрупнение, создание Объединенных энергосистем. Современные ЭЭС представляют собой крупные объединенные энергосистемы, так, например, Единая энергетическая система

России (ЕЭС России) состоит из 75 региональных энергосистем, которые, в свою очередь, образуют 7 объединенных энергетических систем. Все энергосистемы соединены межсистемными высоковольтными линиями электропередачи напряжением 220-500 кВ и выше и работают в синхронном режиме (параллельно). В таких энергосистемах сбой в работе одной части системы могут быстро повлиять на всю систему в целом. Нормальное рабочее состояние может быстро перейти в аварийное или экстремальное состояние, при котором необходимо быстрое и информированное вмешательство человека-оператора. Следовательно, в таких ситуациях операторам необходимо сохранять ситуационную осведомленность.

4. Вследствие широкого внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и других технологий распределенной энергетики энергосистема демонстрирует более быструю и сложную динамику. Поэтому большое внимание уделяется автоматизированным системам управления энергосистемой, что влечет за собой изменение роли и задач операторов в диспетчерских центрах.

1.2 Рабочие состояния ЭЭС. Ситуационную осведомленность оператора ЭЭС можно охарактеризовать, как полную информацию о текущем состоянии (режиме) энергосистемы и всех ее элементов, включая шины, линии электропередачи, выключатели, генераторы, трансформаторы и т.д. Эта информация поступает в диспетчерский центр управления ЭЭС в виде измерений параметров режима и данных о состоянии коммутационного оборудования.

На рис.1, адаптированном из [9], показаны возможные рабочие состояния ЭЭС, в которых она может находиться в зависимости от режима работы, а также возможные переходы между этими состояниями при развитии аварии и при проведении восстановительных мероприятий.



Рис. 1. Рабочие состояния энергосистемы на основе [9]

SA позволяет классифицировать отдельные рабочие состояния электрической сети, и, в свою очередь, состояние определяет, какие аспекты SA важны для оператора.

Нормальный. В нормальном режиме работы все ограничения, которые указывают на то, что режимные переменные не должны превышать максимальных значений, отражающих ограничения физического оборудования, соблюдены, а существующие резервы достаточны. Выработка электроэнергии соответствует существующей нагрузке, а параметры режима находятся в пределах допустимых значений. Возможные сбои могут быть устранены без ограничений.

Тревога. Состояние тревоги (или оповещения) вводится, когда возникают режимные отклонения от штатных ситуаций и вероятность сбоя возрастает. Ограничения соблюдены, но сбой может привести к нарушению некоторых из них (например, перегрузке оборудования). В состоянии тревоги необходимые профилактические меры, например, изменение графика нагрузки, могут восстановить нормальное состояние.

Чрезвычайная ситуация вводится, когда возникают проектные или расчетные аварийные ситуации. Режимные ограничения могут быть нарушены, и для восстановления нормального режима требуется немедленное вмешательство (например, устранение неисправностей, быстрое повторное распределение, переключение нагрузки). Если при этом не будут приняты необходимые превентивные меры, то произойдет серьезное нарушение, система перейдет в критическое аварийное состояние.

В экстремальных условиях возникают нерасчетные (критические) аварийные ситуации. Если системные ограничения были существенно нарушены, а меры, принимаемые в аварийном состоянии, недостаточны, дальнейшие начальные или последующие нарушения приводят к разделению системы, и энергосистема находится в критическом состоянии. Необходимы действия по аварийному управлению, чтобы спасти систему от полного разрушения.

Системная (каскадная) авария. Если таких действий недостаточно, то система может перейти в состояние каскадной аварии, характеризующейся последовательной перегрузкой и отключением многих элементов энергосистемы и нарушением электроснабжения потребителей на значительной территории. Такие аварии характеризуются значительным экономическим ущербом и риском для жизни людей.

Восстановительные работы. Система переходит в восстановительный режим, когда функциями управления выполняется повторное подключение и загрузка оборудования, синхронизация изолированных компонентов системы. После этого в зависимости от обстоятельств система переходит либо в аварийное, либо в нормальное состояние.

1.3 Роль диспетчера при управлении ЭЭС. Большую часть времени ЭЭС находится в нормальном состоянии, в течение которого не происходит нарушений ограничений, поэтому многие инструменты системы EMS, используемые в центре управления, ориентированы на нормальную работу, и это то состояние, с которым операторы имеют наибольший опыт.

Реже система переходит в режим оповещения, аварийный режим и режим восстановления. Однако такие ситуации возникают достаточно часто, поэтому диспетчерский персонал проходит подготовку к ним и, по большей части, располагает необходимыми инструментами для их решения.

Если предупредительные (превентивные) меры не будут приняты вовремя или окажутся неэффективными, а исходное или последующее нарушения будут достаточно серьезными, приводящими к перегрузке системы, система начнет разрушаться и окажется в экстремальном состоянии. Когда ЭЭС находится в этом состоянии, необходимы быстрые управляющие воздействия; в большинстве случаев это приводит к тому, что средства ПА “отключают” аварийные части системы от обслуживания.

По мере роста сложности энергосистем, увеличения количества и скорости сбора данных в диспетчерских центрах управления, а также требований к более быстрой диагностике и принятию решений операторами, достигается так называемый когнитивный барьер человека [15], и информация не может быть воспринята и обработана в дальнейшем. На обеспечение SA в центре ДУ влияет несколько факторов: разработка графических интерфейсов пользователя, стресс и рабочая нагрузка оператора, автоматизированная поддержка принятия решений, сложность применения и обучение оператора. Если все эти факторы будут согласованы с задачами, критические ситуации будут распознаваться быстрее и могут быть успешно устранены, что будет способствовать стабильности и снижению риска сбоев в работе. Следовательно, необходимые данные и информация должны быть собраны из доступных источников информации, а затем отфильтрованы, систематизированы, обобщены и оценены. Для этих целей используется процедура ОС.

2. Роль задачи ОС в Системном операторе ЭЭС

2.1. Задача ОС. Источники данных. Основными источниками данных, предназначенными для поддержки действий диспетчерского персонала при оперативном и противоаварийном управлении ЭЭС и решения задачи ОС, в высоковольтных передающих сетях являются системы SCADA и СМПП – российский аналог WAMS.

SCADA-системы – это интегрированные технологии, включающие в себя: установленные на подстанциях ЭЭС удаленные устройства телемеханики (RTU) для снятия телесигналов о состоянии коммутационного оборудования и телеизмерений параметров режима, коммуникационные сети, базы данных и человеко-машинный интерфейс (HMI). Регистрируемые измерения включают значения напряжения, вводы активной/реактивной мощности и потоки активной/реактивной мощности. Синхронизация времени в SCADA-системах EMS важна для обеспечения корректной работы системы и записи событий с точностью до секунды. Наиболее распространенными методами являются синхронизация по сети (NTP) и синхронизация с помощью GNSS (Global Navigation Satellite System). Скорость передачи данных в SCADA составляет одна выборка за 2 - 5 секунд.

WAMS (СМПП) состоят из измерительных устройств PMU (УСВИ), коммуникационных сетей и концентраторов синхронизированных векторных данных PDC (КСВД). PMU обеспечивают высокоточные измерения комплексов напряжения и тока с отметками времени с помощью технологии GPS. Частота регистрации PMU обычно составляет от 5 до 60 сканирований в секунду [16].

Дополнительно к этим источникам в последнее время в передающих сетях стали использоваться два типа измерительного оборудования: интеллектуальные электронные устройства IEDs (intelligent electronic device) и объединяющие модули MUs (merging units), позволяющие реализовать дополнительные функции при оценке состояния [17].

3. IED определяется, как любое устройство, включающее в себя один или несколько процессоров, способных принимать или отправлять данные, или управляющие воздействия от внешнего источника или к нему (например, цифровые реле, контроллеры). Благодаря возможностям интеграции и интероперабельности IED постепенно заменяют RTU на современных подстанциях [18].

4. Объединяющие модули (Merging Units, MUs) предназначены для сбора выборочных значений от измерительных трансформаторов напряжения и тока и передачи их в IEDs [18]. Частота передачи MUs составляет 80 отсчетов за цикл, т.е. 4000/4800 отсчетов в секунду при частоте 50/60 Гц. Высокая скорость передачи данных позволяет им фиксировать электромагнитные переходные процессы в энергосистемах. Измерения MU не всегда синхронизированы по времени. Поэтому они обычно используются для выполнения локального ОС на объектах ЭЭС в целях защиты.

Задача ОС состоит в поиске таких расчетных значений измеряемых переменных режима, которые наиболее близки к измеренным значениям при условии соблюдения уравнений установившегося режима (УУР) ЭЭС [11,17]. При решении задачи ОС вводится понятие вектора состояния x , включающего комплексы узловых напряжений, зная которые можно рассчитать все измеренные и неизмеренные параметры режима. Классическая постановка задачи ОС сводится к минимизации критерия:

$$J(x) = [\bar{y} - y(\hat{x})]^T \cdot R_y^{-1} \cdot [\bar{y} - y(\hat{x})], \quad (1)$$

где: \bar{y} – вектор измеренных параметров; x – вектор состояния, $y(\hat{x})$ – оценки измеренных параметров, R_y – ковариационная матрица ошибок измерений. Вследствие нелинейной зависимости $y(x)$ задача решается итеративно.

ОС современной ЭЭС включает в себя решение следующих основных задач:

- формирование текущей расчетной схемы сети по данным ТС;
- анализ наблюдаемости полученной расчетной схемы;
- выявление ошибочных ТИ и подавление их влияния на результаты ОС;
- расчет оценок измеряемых и неизмеряемых переменных, которые удовлетворяли бы уравнениям установившегося режима с учетом ограничений в форме неравенств;

Если при вычислении оценок в момент времени t используется информация о состоянии ЭЭС в предшествующие моменты времени ($t-1, t-2, \dots$), то постановка задачи ОС называется *динамической*, иначе – *статической*.

Методы и алгоритмы ОС разрабатывались в России и за рубежом на протяжении более чем 50 лет, и к настоящему времени разработано большое количество методов статического и динамического ОС, которые отличаются минимизируемым критерием, методами поиска оптимума и решения систем нелинейных и линейных уравнений, методами достоверизации измерений и др.

2.2. Требования к процедуре ОС для использования в структуре SA. К измерительной информации и алгоритмам ОС, используемым для реализации в структуре SA, предъявляются высокие требования, заключающиеся в следующем.

1. Высокая частота получения измерений и широкий охват синхронизированными измерениями больших территорий, объединенных ЭЭС. Этим требованиям не удовлетворяют телеизмерения SCADA, поскольку данные SCADA генерируются локально с низкой частотой дискретизации (одна выборка за 2-5 секунд), и частично не синхронизированы по времени. Из-за этих ограничений операторы не имеют возможности отслеживать динамику системы или иметь полный обзор всей объединенной ЭЭС.

На рис. 2 из [19] показаны колебания активной мощности одного из блоков Калининской АЭС, измеряемые устройствами PMU с частотой 0,02 сек, а также телеизмерение SCADA перетока мощности по отходящей от АЭС линии и оценка этого перетока, рассчитанная ПБК КОСМОС по данным SCADA с интервалом 10 сек.

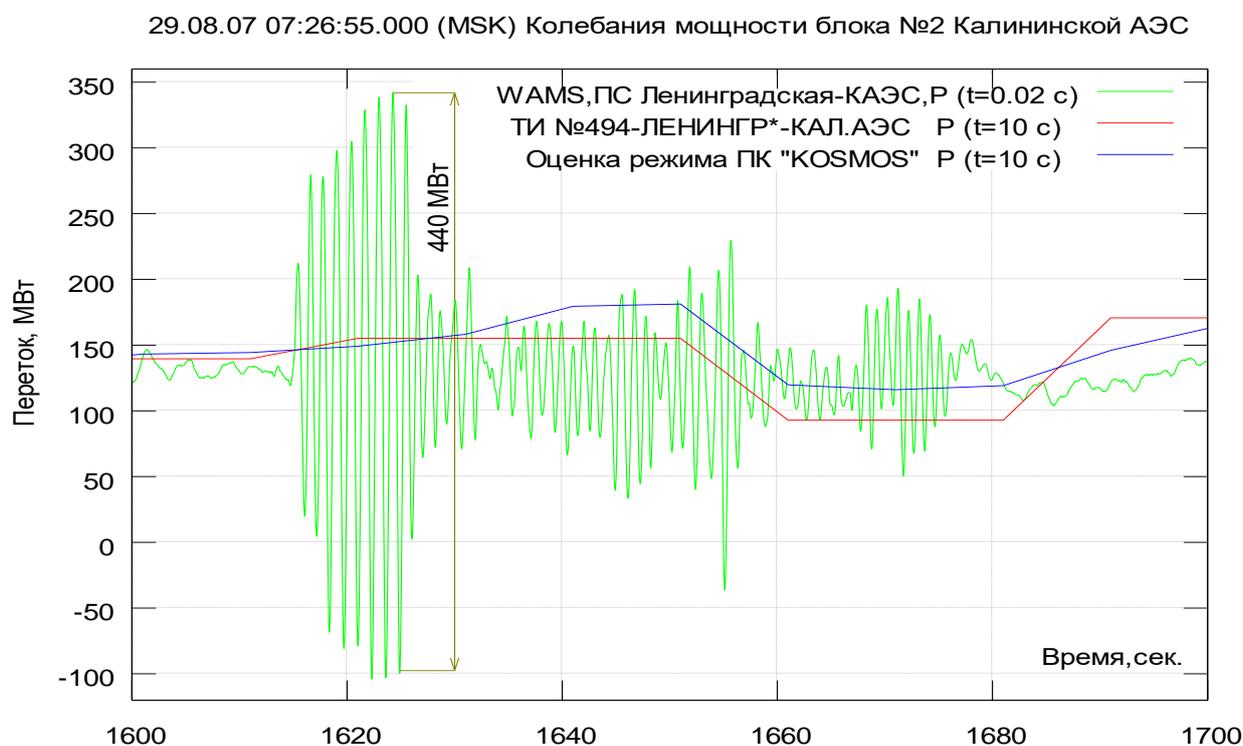


Рис.2. Отображения колебательного процесса перетока мощности средствами WAMS, телеизмерений SCADA и ПК КОСМОС

Как видно из рисунка, колебания перетока мощности на протяжении примерно 15 сек составляют около 400 МВт, но ТИ (телеизмерения) SCADA и рассчитанные по ним оценки не показывают этого. В то же время измерения от PMU, частота регистрации которых составляет от 5 до 60 сканирований в секунду, позволяют отследить эти колебания.

2. Высокое быстродействие алгоритмов ОС, обеспечивающих получение решения в темпе ведения технологического процесса.

Традиционное ОС по ТИ SCADA выполняется не чаще, чем обновляются данные, обычно один раз в интервале от 10 секунд до нескольких минут, кроме того, требуется время на выполнение итерационного алгоритма ОС, которое может оказаться достаточно большим, а в ряде случаев при расчете режимов, близких к аварийным, итерационный процесс может не сойтись.

Если количество PMU достаточно для обеспечения требуемой наблюдаемости схемы энергосистемы, то оценка состояния может быть выполнена только на основе данных PMU. Задача оценки состояния при решении в прямоугольных координатах вектора состояния (U_a , U_r) становится линейной и может быть решена за одну итерацию. Кроме того, благодаря значительно более высокой точности измерений PMU по сравнению с традиционными измерениями SCADA, повышается точность оценок.

3. Достоверность результатов ОС. Процедура ОС должна обнаруживать информацию, искаженную вследствие неисправностей и технических сбоев в системах сбора информации и кибератак, которая может привести к недостоверности результатов ОС. Недостоверные результаты ОС существенно влияют на последующие сетевые и рыночные приложения, поэтому надежные алгоритмы ОС должны иметь эффективную процедуру обнаружения недостоверных данных и служить защитным барьером от проникновения ошибочной информации в процесс принятия решений при управлении энергосистемой.

3. Метод контрольных уравнений для линейного ОС по данным PMU. Задачи, решаемые на базе оценки состояния в реальном времени, предъявляют высокие требования к быстродействию используемых алгоритмов ОС, их надежности и качеству получаемого решения. Этим требованиям удовлетворяет разработанный в ИСЭМ СО РАН метод контрольных уравнений (КУ) [11].

Контрольные уравнения – это уравнения электрических цепей, в которые входят только измеренные переменные режима y :

$$w_k(y) = 0. \quad (2)$$

Они могут быть получены из системы уравнений установившегося режима (УУР) после исключения неизмеренных переменных. Впервые предложенные для достоверизации ТИ, КУ затем стали применяться для решения перечисленных выше задач, входящих в комплекс ОС в реальном времени. КУ позволяют обнаружить недостоверные данные перед выполнением процедуры ОС, при этом априори одновременно выявляются все идентифицируемые ошибочные измерения без повторения процедуры ОС.

Фильтрация случайных ошибок с использованием контрольных уравнений (задача оценивания состояния в узком смысле) при ограничениях (2) решается в координатах y :

$$\min_y (\bar{y} - y)^T R_y^{-1} (\hat{y} - y), \quad (3)$$

Такой подход не требует перехода к вектору состояния x , позволяет учесть точные измерения (при $r_{jj} = 0$ соответствующий y_j не входит в (3), а задается в (2) как константа).

Следует отметить, что на основе контрольных уравнений были разработаны также алгоритмы достоверизации телесигналов, при проведении циклических расчетов контрольные уравнения могут использоваться для идентификации систематических ошибок измерений и их дисперсий и др.

Метод КУ имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной постановкой:

- 1) задача ОС решается непосредственно в координатах вектора измеренных переменных u , что позволяет избежать искажения результатов ОС, вызванного эффектом «размазывания» ошибок;
- 2) алгоритмы ОС по КУ менее трудоемки и имеют высокое быстродействие, так как порядок системы КУ обычно существенно ниже порядка исходной системы УУР;
- 3) КУ позволяют обнаружить недостоверные данные перед выполнением процедуры ОС, при этом априори одновременно выявляются все идентифицируемые ошибочные измерения без повторения процедуры ОС, что делает предложенные алгоритмы быстродействующими.

Кроме того, в отличие от традиционных методов ОС, метод контрольных уравнений позволяет фиксировать значения измеренных переменных, задавая им нулевые дисперсии ($r_{jj}=0$). Это дает преимущества как при решении задачи ОС состояния для полной схемы, так и при декомпозиции расчетной схемы, поскольку позволяет фиксировать значения граничных параметров режима.

С появлением синхронизированных векторных измерений для решения задачи оценивания состояния могут быть использованы линейные алгоритмы. Это становится возможным, если имеется достаточно PMU для обеспечения наблюдаемости. При этом, как показывают исследования, нет необходимости устанавливать PMU во всех узлах сети, достаточно установить их примерно в 1/3 узлов. Задача получения оценок вектора состояния становится линейной и решается за одну итерацию. Помимо простоты вычислений, достоинством такого подхода является повышение точности оценок за счет существенно более высокой точности измерений от PMU по сравнению с обычными ТИ.

Хорошо зарекомендовавший себя метод КУ для ОС по данным SCADA был адаптирован для реализации линейного ОС по данным PMU [12]. Для этого были разработаны алгоритмы формирования линейных контрольных уравнений по измерениям PMU, которые позволяют, используя известную методику ОС по КУ, проводить проверку достоверности входящих в них измерений PMU, вычислять оценки измеренных переменных и оценки вектора состояния без выполнения итераций.

Использование измерений комплексных электрических величин, поступающих от PMU, позволяет существенно улучшить свойства решения задачи ОС – решить ряд проблем, связанных с невысокой избыточностью и низкой точностью измерений, а также существенно повысить эффективность решения задачи ОС как в классической постановке, так и при использовании КУ.

К сожалению, передающие сети ЕЭС России пока еще не полностью наблюдаемы по измерениям PMU, в распределительных сетях устройства PMU практически отсутствуют. В настоящее время PMU установлены на наиболее ответственных объектах энергетики, таких, как межсистемные связи, крупные электростанции и подстанции, объекты атомной энергетики. Это позволяет проводить мониторинг и оценку состояния только для наблюдаемых по данным PMU объектам и регионам, но с развитием системы СМНР и ростом количества PMU эти регионы будут расширяться.

Заключение. Новые свойства ИЭС и современные условия их функционирования повышают актуальность проблемы ситуационной осведомленности диспетчерского персонала энергосистемы при управлении нормальными и аварийными режимами.

Оценивание состояния является эффективным средством поддержки принятия решений и повышения ситуационной осведомленности диспетчерского персонала в режиме реального времени. Для реализации процедуры оценивания состояния в структуре ситуационной осведомленности необходимо обеспечить высокий темп поступления измерений, высокое

быстродействие алгоритмов оценивания состояния, их устойчивость к искажениям информации вследствие технических сбоев и кибератак.

Полученные от WAMS синхронизированные измерения тока и напряжения и их производные составляют основу для создания и функционирования инструментов нового качества для оценивания состояния ЭЭС и анализа их режимов.

В ИСЭМ СО РАН разработан метод КУ, позволяющий выполнять ЛОС по данным PMU. Метод имеет высокое быстродействие, позволяет выявлять грубые и систематические ошибки в измерениях и отличать «скачки» измерений, произошедшие вследствие сбоев и кибератак, от изменения параметров вследствие изменения режима.

Процедура оценивания состояния с использованием измерений PMU обеспечивает более надежные и точные данные для мониторинга состояния ЭЭС на обширной территории в режиме реального времени, а также анализа событий в энергосистеме, и является эффективным средством поддержки принятия решений и повышения ситуационной осведомленности диспетчерского персонала.

Благодарности. Исследование проводится в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2026-0001) программы фундаментальных исследований Российской Федерации на 2026-2030 годы (рег. № АААА-А26-121012190027-4).

Список источников

1. Карантаев В. Ситуационная осведомленность. Введение / В. Карантаев // Блог о Smart Grid, 2018. – URL: <http://smartgridib.blogspot.com/2018/07/blog-post.html>
2. Endsley M.R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 1995, vol. 37, no. 1, pp. 32–64, DOI: 10.1518/001872095779049543.
3. Endsley M.R., Connors E.S. Enhancing Situation awareness in power systems: overcoming uncertainty and variability with renewable resources. *Practical Management of Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids*, 2017, ch. 29, pp. 395-404, DOI: 10.1016/B978-0-12-809592-8.00029-9
4. Wickens C.D. Situation awareness: review of Mica Endsley's 1995 articles on situation awareness theory and measurement. *Human Factors*, 2008, vol. 50, no. 3, pp. 397–403, DOI:10.1518/001872008X288420.
5. Гаськова Д.А. Метод определения уровня кибер-ситуационной осведомлённости энергетических объектов / Д.А. Гаськова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. – № 4 (20). – С. 64-74. – DOI: 10.38028/ESI.2020.20.4.006.
6. Arunagirinathan P., Venayagamoorthy G.K. Situational awareness in an electric utility's control center of its generators' damping capabilities. 2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2017, pp. 1–5, DOI: 10.1109/ISG.T.2017.8086046.
7. Грабчак Е.П. Модель обеспечения ситуационной осведомленности для поддержки принятия решений в энергетике в условиях особого периода и чрезвычайных ситуаций / Е.П. Грабчак, Е.Л. Логинов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары, 2022.
8. Mavridou A., Papa M.A Situational awareness architecture for the smart grid. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 2012, 99, DOI:10.1007/978-3-642-33448-1_31.
9. Prostejovsky A.M., Brosinsky C., Heussen K.. et al. The future role of human operators in highly automated electric power systems. *Electric Power Systems Research*, 2019, vol. 175, p. 105883, DOI: 10.1016/j.eprsr.2019.105883
10. Proceedings of the IEEE Belgrade Powertech Conference, Jun 25-29, 2023, Belgrade, Serbia. Available at: <https://www.proceedings.com/content/070/070187webtoc.pdf>
11. Гамм А.З. Обнаружение грубых ошибок телеизмерений в электроэнергетических системах / А.З. Гамм, И.Н. Колосок. – Новосибирск: Наука, 2000. – 152 с.
12. Kolosok I., Korkina E., Buchinsky E. The test equation method for linear state estimation based on PMU data. *Proceedings of the Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Wroclaw, 2014, DOI: 10.3390/math12233802.
13. Zografopoulos I., Zhao J., Jahromi A., et al. Cyber-Physical. Interdependence for Power System Operation and Control. *IEEE Trans. on Smart Grid*, 2025. DOI 10.1109/TSG.2025.3538012
14. Дьяков А.Ф. Надежность систем энергетики: проблемы, модели и методы их решения / А.Ф. Дьяков, В.А. Стенников, С.М. Сендеров и др. – Новосибирск: Наука, 2014. – 284 с

15. Wollenberg B.F., Sakaguchi T. Artificial intelligence in power system operations. Proceedings of the IEEE, 1987, vol. 75, no. 12, pp. 1678–1685, DOI: 10.1109/PROC.1987.13935.
16. Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. – New York, NY, USA: Springer, 2008.
17. Cheng G., Lin Y., Abur A., Gómez-Expósito A., Wu W. A survey of power system state estimation using multiple data sources: PMUs, SCADA, AMI, and beyond. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, vol. 15, no. 1, pp. 1–1, DOI: 10.1109/TSG.2023.3286401
18. Thomas M.S., McDonald J.D. Power System SCADA and Smart Grids. – CRC Press, 2017.
19. Данилин А.В. Развитие технологии векторной регистрации параметров режима в ЕЭС России. – В кн.: Информационные технологии в электроэнергетике: материалы конференции. – Москва, 2010.

Колосок Ирина Николаевна. Д.т.н., ИСЭМ СО РАН, в.н.с. Основные направления исследований: Математические модели, методы и алгоритмы для решения комплекса задач информационного обеспечения для мониторинга и диспетчерского управления интеллектуальной энергосистемой (ИЭС) на базе современных средств измерений и новых информационных технологий, кибербезопасность и киберфизическая устойчивость ИЭС и ее объектов. AuthorID: 48007871, SPIN: 6463-5100, ORCID: 0000-0002-2843-4455. kolosok@isem.irk.ru. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Коркина Елена Сергеевна. К.т.н., ИСЭМ СО РАН, с.н.с. Основные направления исследований: кибербезопасность объектов электроэнергетики, синхронизированные векторные измерения, оценивание состояния электроэнергетических систем, кибер-физические системы. AuthorID: 24577537100, SPIN: 8084-7363, ORCID: 0000-0001-6488-5774, korkina@isem.irk.ru. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

UDC 004.413.4

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.007

The role of the State Estimation problem in ensuring situational awareness of the Smart Grid operator

Irina N. Kolosok, Elena S. Korkina

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,

Russia, Irkutsk, kolosok@isem.irk.ru

Abstract. For reliable and fault-tolerant operation of an intelligent power system (IPS) operating in constantly changing conditions, monitoring and dispatching control in real time are necessary. Although many IPS control processes are automated, namely the dispatching personnel that keeps the system running. Situational awareness (SA) of an IPS operator can be described as complete information about the current IPS state. The insufficient level of the operator's SA significantly affects the likelihood that the system will enter a cascading power outage phase, and this transition is confirmed by numerous incidents in the power systems. The complexity of power systems is constantly rising, it increases the risk that human operators will not be able to manage the network in any situation if their cognitive abilities are not supported by appropriate tools. Such tools include the State Estimation (SE) procedure, which is the most important function that provides real-time calculation of the current EPS state.

The article discusses the issues of using the SE procedure to increase situational awareness in dispatching control of IPS (Smart Grid). The features of Smart Grid are formulated, which determine the relevance of research on the SA problem and the need to develop situational awareness of Smart Grid operators. The Smart Grid operating conditions, also the role of the dispatcher in emergency situations and during recovery measures are considered. The value of the Power System State Estimation (PSSE) in improving the SA of the power system dispatcher is presented. The analysis of the main data sources used to solve the PSSE problem has been performed. The requirements for the PSSE procedure when used in the SA structure are formulated. A PSSE Test Equations method developed at the Melentiev Energy Systems Institute (MESI SB RAS) based on synchronized phasor measurement (PMU data) that meets these requirements is presented. It is shown that the SE procedure provides information of the required quality for the tasks of dispatching control and monitoring of the Smart Grid and is an effective means of supporting decision-making and increasing situational awareness of Smart Grid operators.

Keywords: smart Grid, situational awareness, power system state estimation, synchronized phasor measurements (PMU data)

Acknowledgements: This study was carried out within the framework of the state assignment project (No. FWEU-2021-0001) of the program of fundamental research of the Russian Federation for 2021-2030 (Reg. No. AAAA-F21-121012190027-4).

References

1. Karantaev V. Situatsionnaya osvedomlennost. Vvedeniye [Situational Awareness. Introduction]. Blog o Smart Grid [Smart Grid Blog], 2018. Available at: <http://smartgridib.blogspot.com/2018/07/blog-post.html> (accessed: 03.15.2025).
2. Endsley M.R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 1995, vol. 37, no. 1, pp. 32–64, DOI: 10.1518/001872095779049543.
3. Endsley M.R., Connors E.S. Enhancing Situation awareness in power systems: overcoming uncertainty and variability with renewable resources. *Practical Management of Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids*, 2017, ch. 29, pp. 395-404, DOI: 10.1016/B978-0-12-809592-8.00029-9
4. Wickens C.D. Situation awareness: review of Mica Endsley's 1995 articles on situation awareness theory and measurement. *Human Factors*, 2008, vol. 50, no. 3, pp. 397–403, DOI:10.1518/001872008X288420.
5. Gaskova D.A. Metod opredeleniya urovnya kiber-situatsionnoy osvedomlennosti energeticheskikh ob'yektov [Method for determining the level of cyber situational awareness of energy facilities]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2020, no. 4 (20), pp. 64-74, DOI: 10.38028/ESI.2020.20.4.006.
6. Arunagirinathan P., Venayagamoorthy G.K. Situational awareness in an electric utility's control center of its generators' damping capabilities. 2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2017, pp. 1–5, DOI: 10.1109/ISG.T.2017.8086046.
7. Grabchak E.P., Loginov E.L. Model obespecheniya situatsionnoy osvedomlennosti dlya podderzhki prinyatiya resheniy v energetike v usloviyakh osobogo perioda i chrezvychaynykh situatsiy [A model for ensuring situational awareness to support decision-making in the energy sector under special conditions and emergencies]. *Informatsionnyye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Information Technologies in Electrical Engineering and Electric Power Industry: Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Technical Conference]. Cheboksary, 2022.
8. Mavridou A., Papa M. A Situational awareness architecture for the smart grid. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 2012, 99, DOI:10.1007/978-3-642-33448-1_31.
9. Prostejovsky A.M., Brosinsky C., Heussen K. et al. The future role of human operators in highly automated electric power systems. *Electric Power Systems Research*, 2019, vol. 175, p. 105883, DOI: 10.1016/j.eprsr.2019.105883
10. Proceedings of the IEEE Belgrade Powertech Conference, Jun 25-29, 2023, Belgrade, Serbia. Available at: <https://www.proceedings.com/content/070/070187webtoc.pdf>
11. Gamm A.Z., Kolosok I.N. Obnaruzheniye grubyykh oshibok teleizmereniy v elektroenergeticheskikh sistemakh [Detection of Gross Errors of Telemetry in Electric Power Systems]. *Novosibirsk, Nauka [Science] Publ.*, 2000, 152 p.
12. Kolosok I., Korkina E., Buchinsky E. The test equation method for linear state estimation based on PMU data. *Proceedings of the Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Wroclaw, 2014, DOI: 10.3390/math12233802.
13. Zografopoulos I., Zhao J., Jahromi A., et al. Cyber-Physical. Interdependence for Power System Operation and Control. *IEEE Trans. on Smart Grid*, 2025, DOI 10.1109/TSG.2025.3538012.
14. D'yakov A.F., Stennikov V.A., Senderov S.M., et al. Nadezhnost' sistem energetiki: problemy, modeli i metody ih resheniya [Reliability of energy systems: problems, models and methods for their solution]. *Novosibirsk: Nauka*, 2014, 284p.
15. Wollenberg B.F., Sakaguchi T. Artificial intelligence in power system operations. *Proceedings of the IEEE*, 1987, vol. 75, no. 12, pp. 1678–1685, DOI: 10.1109/PROC.1987.13935.
16. Phadke A.G., Thorp J.S. *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. – New York, NY, USA: Springer, 2008.
17. Cheng G., Lin Y., Abur A., Gómez-Expósito A., Wu W. A survey of power system state estimation using multiple data sources: PMUs, SCADA, AMI, and beyond. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, vol. 15, no. 1, pp. 1–1, DOI: 10.1109/TSG.2023.3286401
18. Thomas M.S., McDonald J.D. *Power System SCADA and Smart Grids*. – CRC Press, 2017.
19. Danilin A.V. Razvitiye tekhnologii vektornoy registratsii parametrov rezhima v YeES Rossii [Development of technology for vector registration of regime parameters in the Unified Energy System of Russia].

Informatsionnyye tekhnologii v elektroenergetike: materialy konferentsii [Information Technologies in Electric Power Industry: Conference Proceedings]. Moscow, 2010.

Kolosok Irina Nikolaevna. Professor, Leading Researcher of Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Main research areas: Mathematical models, methods and algorithms for solving a set of information support tasks for monitoring and dispatching of Smart Grid based on modern measuring instruments and new information technologies, cybersecurity and cyber-physical stability of the Smart Grid and its facilities. AuthorID: 48007871, SPIN: 6463-5100, ORCID: 0000-0002-2843-4455. kolosok@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, Russia, Lermontov Str., 130.

Korkina Elena Sergeevna. Doctor, Senior Researcher of Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Main research areas: cybersecurity of electric power facilities, synchronized vector measurements, assessment of the state of electric power systems, cyber-physical systems. AuthorID 24577537100, SPIN 8084-7363, ORCID 0000-0001-6488-5774, korkina@isem.irk.ru. 664033, Irkutsk, Russia, Lermontov Str., 130.

Статья поступила в редакцию 14.06.2025; одобрена после рецензирования 22.09.2025; принята к публикации 17.02.2026.

The article was submitted 06/14/2025; approved after reviewing 09/22/2025; accepted for publication 02/17/2026.

Алгоритмическое BIM-моделирование поверхностей нагрева паровых котлов тепловых электростанций

Лебедев Константин Викторович¹, Бойко Евгений Анатольевич¹, Куличкин Алексей Павлович¹, Лойко Владимир Павлович¹, Бобров Алексей Васильевич¹, Новицкий Дмитрий Александрович², Посохов Юрий Михайлович²

¹Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск, klebedev@sfu-kras.ru

²ООО Сибирская генерирующая компания, Россия, Москва

Аннотация. В статье представлен опыт создания BIM-моделей котлов тепловых электростанций, а также особенности моделирования отдельных элементов котельного агрегата. Рассмотрена статистика отказов теплоэнергетического оборудования и приведен сравнительный анализ по различным элементам котельного оборудования и поверхностям нагрева. На основе этих данных была проведена сравнительная оценка надежности различных элементов котельного агрегата, что обосновывает актуальность детального моделирования поверхностей нагрева. Показано, что BIM-модель выступает не как конечный продукт, а как интегральный компонент комплексной информационной системы. В связи с этим предложена концепция интеграции разработанных моделей в структуру «цифрового двойника» для использования в системах управления жизненным циклом и техническим обслуживанием энергетических активов. Описаны технологические и алгоритмические аспекты создания моделей для каждой поверхности нагрева и узла. Предложен алгоритмический подход к построению геометрии элементов котельного оборудования, основанный на формализации операций моделирования в виде специализированного языка последовательных трансформаций («turtle language»). Данный язык описывает последовательность операций вытягивания, поворотов и пространственных преобразований трубных элементов, что позволяет воспроизводить сложную пространственную конфигурацию поверхностей нагрева на основе параметрических данных проектной документации. Практическая реализация подхода выполнена в виде программной библиотеки на языке Python с использованием открытых инструментов формирования IFC-моделей, обеспечивающих совместимость с BIM-средами и инженерными системами анализа. В работе представлен математический аппарат преобразования координат и алгоритмы перехода от локальных систем координат к глобальной системе модели, обеспечивающие корректное позиционирование элементов при последовательных трансформациях. Разработанный инструментарий позволяет автоматически генерировать детализированные трёхмерные модели котельных агрегатов, пригодные для последующего использования в CAE-расчётах, системах мониторинга состояния оборудования, планировании ремонтов и обучении персонала. Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенного подхода и его перспективность для применения при создании цифровых двойников объектов теплоэнергетики и развитии систем управления техническим состоянием оборудования.

Ключевые слова: BIM-моделирование, поверхности нагрева, котельный агрегат, цифровой двойник, твердотельное моделирование, управление активами, электронный ремонтный формуляр

Цитирование: Лебедев К.В. Алгоритмическое BIM-моделирование поверхностей нагрева паровых котлов тепловых электростанций / К.В. Лебедев, Е.А. Бойко, А.П. Куличкин, В.П. Лойко, А.В. Бобров, Д.А. Новицкий, Ю.М. Посохов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 104-122 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.008.

Введение. Создание BIM-моделей энергетического оборудования служит основой для разработки цифровых двойников. Цифровые двойники и киберфизические системы все чаще привлекают к себе внимание из-за активного исследования и внедрения во многих отраслях производства. Вследствие стремительного развития информационных технологий появилась возможность сбора, хранения, передачи и анализа больших массивов данных, собираемых с реальных объектов. Благодаря этому обнаружилась необходимость пересмотра стандартных подходов к управлению производственными процессами на предприятиях [1].

Основой для разработки цифрового двойника сложного технологического оборудования, такого, как, например, котельный агрегат тепловой электростанции (ТЭС), является его детальная информационная модель (BIM) [2]. Настоящая статья посвящена разработке

методологии автоматизированного создания таких моделей. В работе последовательно рассматриваются: специфика моделирования отдельных элементов котельного агрегата, лежащий в основе математический аппарат и концептуальные основы применения созданных моделей. Разработка BIM-модели выполнялась посредством написания специализированных программ-скриптов на языке программирования Python. При описании графического построении геометрических объектов BIM-модели в специализированных программах-скриптах разработана и применена Python-библиотека. Эта библиотека интерпретирует команды предметно-ориентированного языка последовательных трансформаций и преобразует их в вызовы библиотеки IfcOpenShell для построения трехмерного представления элементов котельного агрегата [3].

Котельное оборудование как объект для BIM-моделирования. Котельный агрегат тепловой электрической станции – это сложный объект, состоящий из множества элементов: непосредственно каркаса, поверхностей нагрева, элементов крепления, оборудования собственных нужд котельного агрегата и др. С точки зрения риск-ориентированного управления наибольший интерес представляет моделирование поверхностей нагрева котельного агрегата. Опыт эксплуатации показывает, что 50-70% отказов энергоблоков приходится именно на поверхности нагрева котлов [4].

Поверхности нагрева являются наименее надежным элементом котельного оборудования (рисунок 1), что связано с многообразием факторов, влияющих на условия работы металла, когда их сочетание создает такое напряженно-деформированное состояние, которое приводит к аварийным отказам оборудования, следствием чего становятся длительные простои (до нескольких суток) и ускоренная деградация всего энергоблока.



Рис. 1. Распределение отказов котельного оборудования и поверхностей нагрева

В связи с этим разработка и внедрение методов, позволяющих детально анализировать конструкцию, контролировать состояние и оптимизировать ремонтные работы поверхностей нагрева, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

В статье сформированы основные принципы BIM-моделирования поверхностей нагрева котлов, т.к. такие модели позволяют решить сразу комплекс задач энергетики:

1. BIM-модели представляют собой развернутую подробную визуализацию поверхностей нагрева с полной информацией об их элементах, содержащих сведения о материале, массе, геометрических размерах, что может служить для решения таких задач, как: обучение персонала по конструкции котла, создание формуляров для ремонтного персонала, получение чертежей отдельных узлов котла и т.п [5].
2. BIM-модели представляют собой базу данных элементов, которая может быть расширена и дополнена любой технической информацией. Например, за каждым из элементов может вестись мониторинг температур и нагрузок, что позволит осуществлять прогнозирование отказов на основе математических алгоритмов, моделирующих усталостные явления в металле. Также в такую базу возможно вносить данные разрушающего и неразрушающего контроля лаборатории металлов, а потом, в свою

очередь, прогнозировать отказ на основе алгоритмов экстраполяции или машинного обучения.

3. Визуальный анализ интенсивности отказов поверхностей нагрева может указывать на некоторые неявные дефекты котла. Например, постоянные отказы в какой-то определенной зоне могут говорить о наличии внутритрубных отложений, что может приводить к локальным перегревам отдельных элементов.
4. Возможность использования BIM-моделей для компьютерного математического моделирования. С помощью BIM-модели можно выполнять механические, гидродинамические (CFD) и другие расчеты. CFD-моделирование основано на численном решении систем дифференциальных уравнений, описывающих движение жидкости или газообразной среды. Это направление дает возможность каждому элементу BIM-модели присвоить индивидуальные свойства (например, марку стали) и задать рабочую среду (например, рабочее тело с определенными параметрами). Современные системы CFD-моделирования в синтезе с механическими расчетами позволят численно изучать целый спектр процессов, происходящих в установке (определить точки максимального напряжения, определить процессы развития эрозии, коррозии, усталостных явлений в металлах и др.) [6, 7]. В частном случае, CFD-моделирование может ответить на вопрос, какие изменения произойдут в системе котла, если заменить один или несколько элементов котла на элементы из другой марки стали. Из представленного выше видно, что наибольший интерес к BIM-моделированию представляет именно моделирование поверхностей нагрева.

Постановка задачи BIM-моделирования котельных агрегатов тепловых электрических станций и представление концепции аналитической системы. Для моделирования используется IFC формат. IFC (Industry Foundation Classes) – это формат файлов, который используется для обмена информацией между участниками строительного процесса. IFC используется для передачи информационных моделей, включая геометрию, материалы, атрибуты и другие данные. Формат поддерживается многими программными продуктами для проектирования и строительства, что делает его универсальным инструментом для обмена данными.

На рисунке 2 представлена концепт-модель цифрового двойника тепловой электростанции.



Рис. 2. Ключевые задачи реализации интеллектуальных систем управления теплоэнергетического оборудования (на примере котельной установки ТЭС)

Для обеспечения бесшовной интеграции разнородной информации в рамках такой интеллектуальной системы необходим единый, не привязанный к конкретному производителю ПО, стандарт обмена данными. Формат IFC полностью отвечает этим требованиям, что делает его ключевым инструментом для создания информационных моделей энергетических объектов.

Для реализации поставленной задачи используются технологии BIM-моделирования. Однако создание BIM-моделей отдельных котельных агрегатов само по себе не решает задачи эффективного управления активами станции. Для этого необходима интеграция разрозненных моделей и данных в единую информационно-аналитическую платформу, которая позволит комплексно использовать результаты моделирования на уровне всей ТЭС (рис. 3) [8].

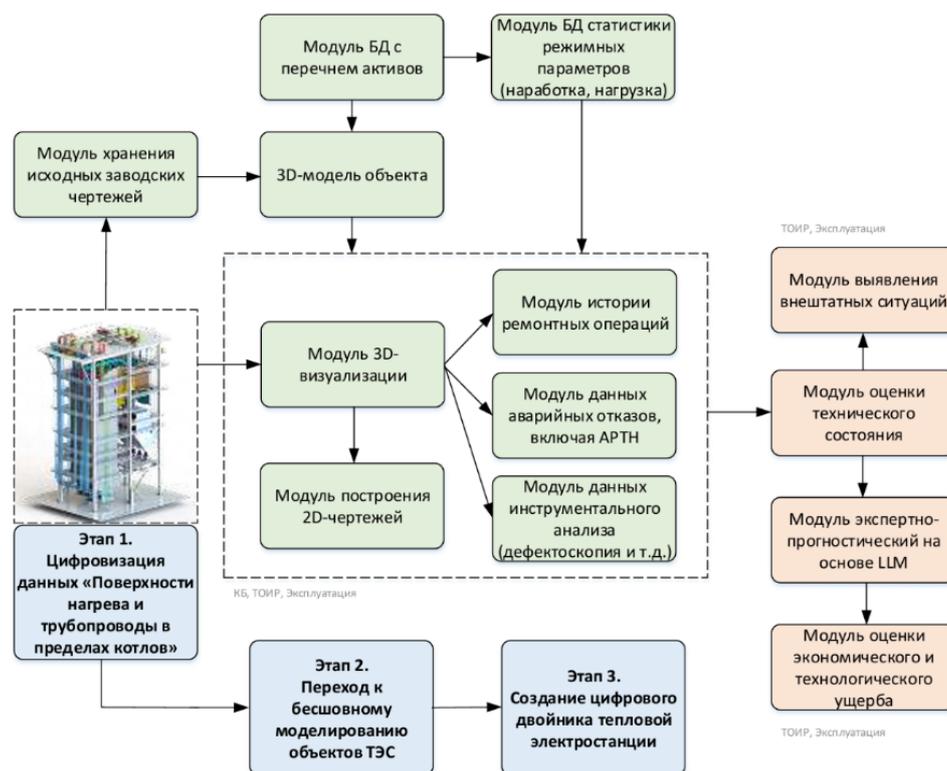


Рис. 3. Концептуальная модель построения информационно-аналитической системы «Цифровой двойник ТЭС»

Условные обозначения: IFC – формат хранения данных; БД – база данных; ИАС – информационно-аналитическая система; ТЭС – тепловая электростанция; АРТН – акт расследования технологических нарушений; ML – machine learning – машинное обучение;

КБ – конструкторское бюро; ТОИР – техническое обслуживание и ремонты

Рассматривается разработка программного комплекса, представляющего собой единую модульную расширяемую платформу, выполняющая функции сбора, хранения, обработки, анализа и визуализации данных для обеспечения эффективного управления, мониторинга и оптимизации технических активов ТЭС. Функциональность разрабатываемой платформы направлена на решение комплекса задач. Система обеспечивает централизованное хранение данных об активах ТЭС и предоставляет инструменты для управления ими (загрузка, обновление, поиск, фильтрация). Пользовательский интерфейс включает функции для отображения и работы с 3D-моделями, а аналитический блок позволяет проводить расчеты надежности и оптимизации. Особое внимание уделено обеспечению безопасности, контролю доступа, а также масштабируемости и расширяемости всей системы. Ключевой задачей становится выбор или разработка инструментария для создания BIM-моделей. На первый

взгляд, для этого можно было бы использовать существующие коммерческие IFC-редакторы и системы автоматизированного проектирования (САПР). Однако анализ специфики котельного оборудования выявил ряд существенных ограничений такого подхода.

Обоснование выбора инструментария для BIM-моделирования. Принятие решения о разработке собственной программной библиотеки вместо использования готовых IFC-редакторов было обусловлено следующими факторами:

1. Экономическая доступность и лицензионные ограничения. Большинство профессиональных BIM-платформ являются проприетарными продуктами и требуют значительных затрат на приобретение лицензий. Разработка собственного инструмента на базе открытого ПО позволяет избежать этих расходов и обеспечивает неограниченную масштабируемость решения [9].
2. Специфика геометрии теплоэнергетического оборудования – это ключевой технический аргумент. Поверхности нагрева котлов состоят из тысяч труб со сложной пространственной геометрией. В проектной документации их форма часто задается не визуально, а последовательностью параметрических трансформаций (сдвиги, повороты, гибы). Стандартные САПР, ориентированные на прямое ручное моделирование, не имеют встроенных средств для интерпретации таких алгоритмических описаний. Попытка воссоздать подобную геометрию вручную была бы чрезвычайно трудоемкой и привела бы к накоплению ошибок.
3. Трудоемкость и автоматизация. Алгоритмический подход к моделированию, где геометрия генерируется кодом на основе исходных данных (“turtle language”), оказывается значительно эффективнее ручного моделирования в 3D-редакторе. Разработка собственной библиотеки позволяет автоматизировать создание сложных и однотипных элементов, что кардинально снижает трудозатраты и повышает точность моделей.

Учитывая перечисленные ограничения, было принято решение о разработке специализированной python-библиотеки «IFC_for_TPP» (IFC for Thermal Power Plants), которая позволяет генерировать IFC-модели поверхностей нагрева на основе параметрического описания их геометрии. Такой подход обеспечивает необходимую гибкость, точность и эффективность.

Описание python-библиотеки и ее программная реализация. Создание библиотеки элементов – одна из ключевых задач выполненной работы. Использование библиотеки позволяет оптимизировать работу программного обеспечения, тиражировать элементы, делать привязки построенных 3D моделей к исходным чертежам. Такой широкий спектр задач обеспечивается за счет использования сразу нескольких программных продуктов. Создание библиотек позволяет существенно ускорить процесс создания подобных систем (котлов), за счет копирования схожих элементов и доработки отличий.

В рамках моделирования используется следующее ПО:

- IfcOpenShell 0.8.3 – библиотека для разработки IFC с открытым исходным кодом, позволяющая создавать и редактировать IFC файлы в соответствии со стандартом IFC;
- язык программирования Python не ниже версии 3.11.7 для написания модулей, обеспечивающих построение BIM-модели котла

Как видно из таблицы 1, с каждой новой версией IFC формат пополняется новыми геометрическими представлениями и совершенствуются существующие, но один ключевой фактор остается неизменным – это взятый за основу формат STEP для представления твердотельной модели. В соответствии с документацией buildingSMART, IFC формат поддерживает следующие геометрические представления: CSG primitive, Extruded solid, BRep

model, Surface model и Tessellated item [10]. В моделировании, проведенном авторами, использовался Triangulated BRep.

Таблица 1. Развитие геометрических представлений в формате IFC

Версия	Основные геометрически представления	Нововведения
	CSG, BRep	Только базовая геометрия
2.x	Swept Solids, IfcShapeRepresentation	Добавление профилей и 2D-геометрии
2x3	Triangulated BRep, NURBS	Поддержка сложных поверхностей
4.0	Advanced BRep, Tessellation, Swept Disk	Поддержка органических форм и сложной тесселяции
4.3	Инфраструктурные улучшения	Линейные объекты для дорог и мостов

В рамках демонстрации возможностей библиотеки рассмотрены:

1. Особенности моделирования трубных элементов и поверхностей нагрева котельных агрегатов.
2. Вопросы согласования локальных и глобальных координат при технологических операцияхгиба трубы.
3. Примеры 3D-моделей котлов, полученных на основе использования разработанной библиотеки.

Построение 3D-моделей выполняется с помощью языка последовательных трансформаций, названным «turtle language». Данный язык регламентирует последовательность операций моделирования, т.е. построение объекта начинается с какого-либо плоского эскиза и данный эскиз в процессе построения проходит через различные трансформации, например, вытягивание, гиб, изменение размера сечения и т.д. Этот принцип продемонстрирован на рисунке 4.

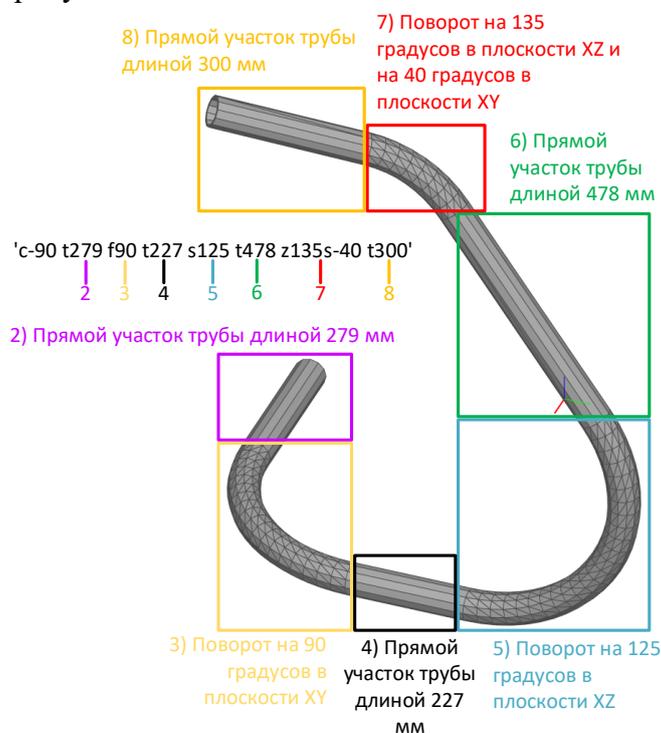


Рис. 4. Построение сложного элемента – трубы с изгибами

Авторская библиотека [11] включает пять модулей (рисунок 5), обеспечивающих построение IFC-моделей котлов: move.py, boiler_parts_generator.py, ifc_creating.py, clear_function.py, ports_for_every_part.py.

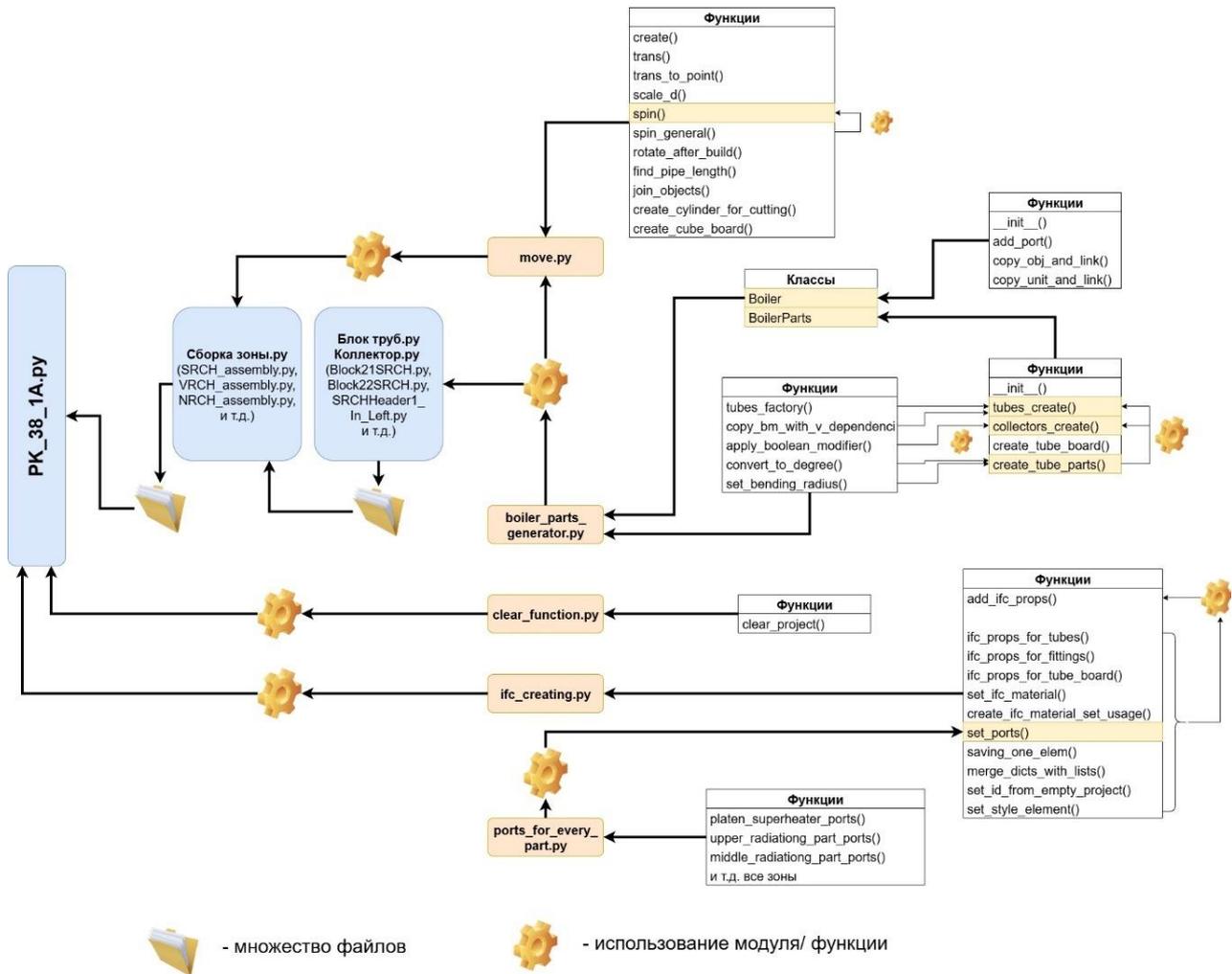


Рис. 5. Структура взаимодействия модулей библиотеки IFC for TPP

Move.py содержит в себе процедуры с элементарными геометрическими операциями для построения (вытягивание, гиб в одной плоскости, гиб в двух плоскостях, увеличение диаметра и т.д.) и функцию по повороту и перемещению локальной сборки (rotate_after_build).

Boiler_parts_generator.py содержит функции, реализующие все операции, находящиеся в move.py, а именно:

- описание классов Boiler и BoilerParts;
- функции по созданию труб (tubes_create), коллекторов (collectors_create), трубных досок (create_tube_board);
- вспомогательные функции для построения (конвертация минут в градусы, получение радиусагиба, применение булевой операции и т.д.).

Ifc_creating.py предоставляет функции для создания IFC-моделей и назначения им геометрических и физических свойств. Этот модуль использует библиотеку IfcOpenShell.

Clear_function.py реализует единственную процедуру по очистке проекта (clear_project), которая удаляет все объекты со сцены, все мэши и материалы.

В Ports_for_every_part.py реализованы функции, предназначенные для установки портов (IfcPort) для каждой зоны котла. Каждому элементу можно присвоить определенное количество портов. Порты, в свою очередь, позволяют задавать направление движения среды для каждого элемента.

Особенности создания отдельных элементов котла. Паровой котел тепловой электростанции можно разделить на несколько крупных элементов или узлов, требующих существенно различных способов реализации.

Первый крупный узел – это блоки труб, т.е. трубы, расположенные в ряд или несколько рядов относительно друг друга, составляют большинство поверхностей нагрева: зоны топки (НРЧ, СРЧ, ВРЧ), трубы пароперегревателей, водяного экономайзера, трубы воздухоподогревателя и т.д.

Построение любого элемента начинается с задания свойств модели и ее наименования. Далее проводится задание геометрических свойств труб, из которых состоит блок:

- параметр `step` указывает (в м), на каком расстоянии на оси у друг от друга на чертеже блока располагаются трубы;
- параметр `R_global` обозначает радиус для всех поворотов труб в блоке, указывается в м на чертеже труб;
- параметр `r` обозначает внешний радиус труб в блоке, указывается в м в основной надписи чертежей труб;
- параметр `w` обозначает толщину стенки труб в блоке, указывается в м в основной надписи чертежей труб.

Здесь представлена лишь часть свойств, модель может содержать свойства, как относящиеся к блоку в целом, так и к конкретной трубе.

Моделирование блока труб происходит путем заполнения словаря `geom` (уникальные трубы) кодом, регламентирующим последовательные трансформации; список `seq` заполняется названиями уникальных труб. Этот список определяет последовательность появления труб. Пример кода представлен на листинге 1.

Листинг 1. Список появления труб и «turtle language» каждой трубы

```
seq = [['6'], ['7']] * 30 + ['6'] + ['5'] + ['4'] + ['3'] + ['2'] + ['1']
geom = {
'1': 'c18 t327 s18 t3681 s90r0.075 t451 f-90r0.075 t138 z-60f90r0.075 t127',
'2': 'c18 t297 s18 t3645 s90r0.075 t430 f-90r0.075 t174 z-60f90r0.075 t169',
'3': 'c18 t327 s18 t3609 s90r0.075 t409 f-90r0.075 t210 z-60f90r0.075 t210',
'4': 'c18 t297 s18 t3573 s90r0.075 t389 f-90r0.075 t246 z-60f90r0.075 t252',
'5': 'c18 t327 s18 t3537 s90r0.075 t368 f-90r0.075 t282 z-60f90r0.075 t293',
'6': 'c18 t297 s18 t3541 s60 t670',
'7': 'c18 t327 s18 t3936 s90 t494'}
```

Построение трубы всегда начинается с создания стартового кольца в плоскости XY параметром «с», после которого указывается угол наклона стартового кольца в плоскости XY.

Далее, после размещения стартового кольца трубы, начинается построение геометрии. Основные команды построения геометрии:

- `t(число)`, строит прямой участок трубы длиной, указанной числом в мм; например, команда `t100` строит прямой участок длиной 100 мм;
- `s(число)`, строит поворот в плоскости XZ на угол, указанный числом; например, использование команды `s30` строит поворот в плоскости XZ углом 30 градусов;
- `f(число)`, строит поворот в плоскости YZ на угол, указанный числом;
- `z` – применяется, когда необходимо делать поворот сразу в двух плоскостях – двойной поворот; например, поворот в плоскости XZ 90 градусов и в плоскости YZ 45 градусов будет выглядеть так: `z45s90`.

На рис. 6 представлен пример сборки блока труб и составного экрана из нескольких блоков.

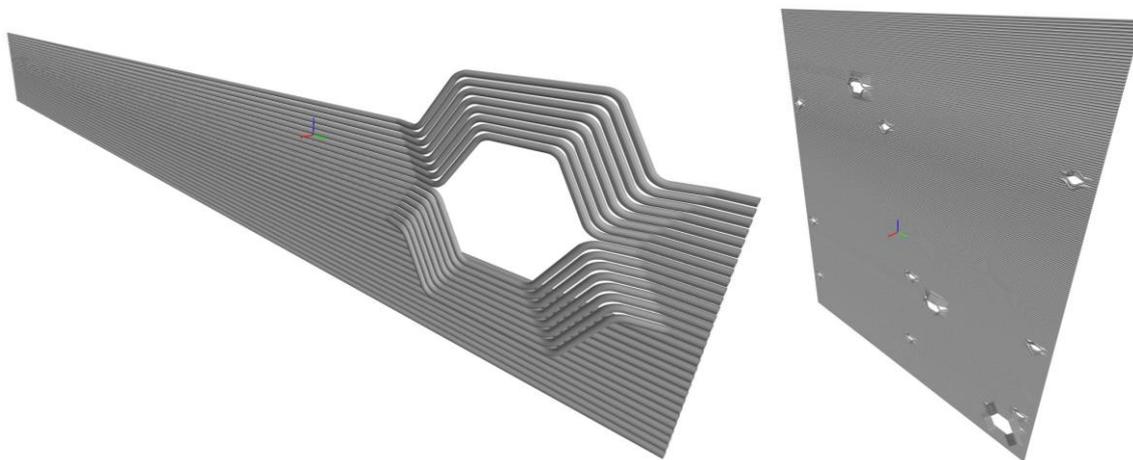


Рис. 6. Сборка зоны нагрева и топочного экрана из различных зон

При создании газоплотной поверхности мембранного типа (рис. 7) в библиотеке предусмотрено расширение стандартного синтаксиса построения труб, когда ставится флаг для старта построения мембраны Ms и для ее окончания Mf. Для свойств мембран заполняется соответствующий словарь. Разработан код для построения поверхности мембранного типа.

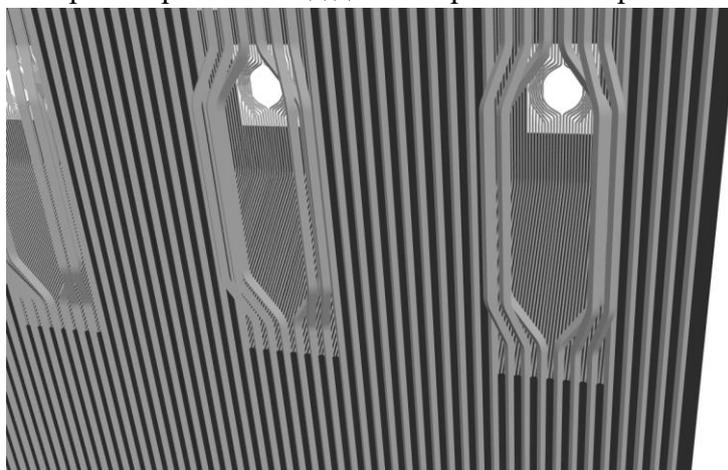


Рис. 7. Пример реализации экранов с мембранами

Отдельным элементом, заслуживающим рассмотрения, является коллектор – часть элемента котельного агрегата, где собираются все трубы. Данный элемент строится аналогично трубам блока через словари geom и seq, но имеет ряд особенностей. Поскольку коллектор строится в одном экземпляре, для его построения нет необходимости размещать трубы, сдвигая их по оси Y. В этом элементе необходимо иметь составную трубу из нескольких разных частей (рис. 8). Для этого предусмотрен особый синтаксис для списка seq, позволяющий применять для каждой части трубы разный диаметр и толщину стенки, а также команду sr, означающую продолжение построения трубы с финальной координаты и матрицы поворота предыдущей операции, но при этом имея новый элемент. Разработан соответствующий код для построения коллектора.

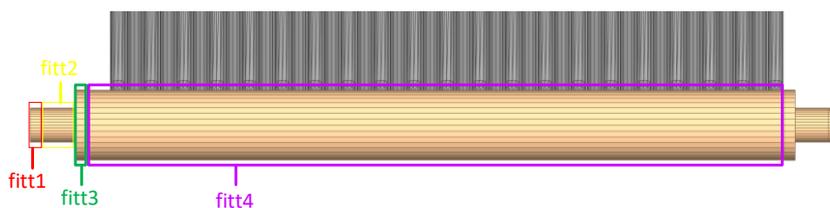


Рис. 8. Пример реализации коллектора

Сборка зоны нагрева осуществляется путем расстановки компонентов. Прописывается название компонента и задается функция создания и расположения компонента `model_create_and_place`. В эту функцию передается ряд аргументов:

- координаты x, y, z – размещение объекта в координате;
- углы в плоскостях x, y, z – поворот компонента в координатных плоскостях;
- m – параметр, в котором задаётся матрица поворота компонента;
- `start_rings` – параметр, в котором задаётся размещение стартовых колец компонента.

Первый размещаемый компонент базово располагается в координате $x = 0, y = 0, z = 0$. После этого задаются углы поворота компонента. Матрицы поворота и стартовые кольца в первом компоненте не задаются. Разработан код для сборки поверхности блоков.

На рисунке 9 представлена полная сборка зоны НРЧ и всей топки котла ПК-38.

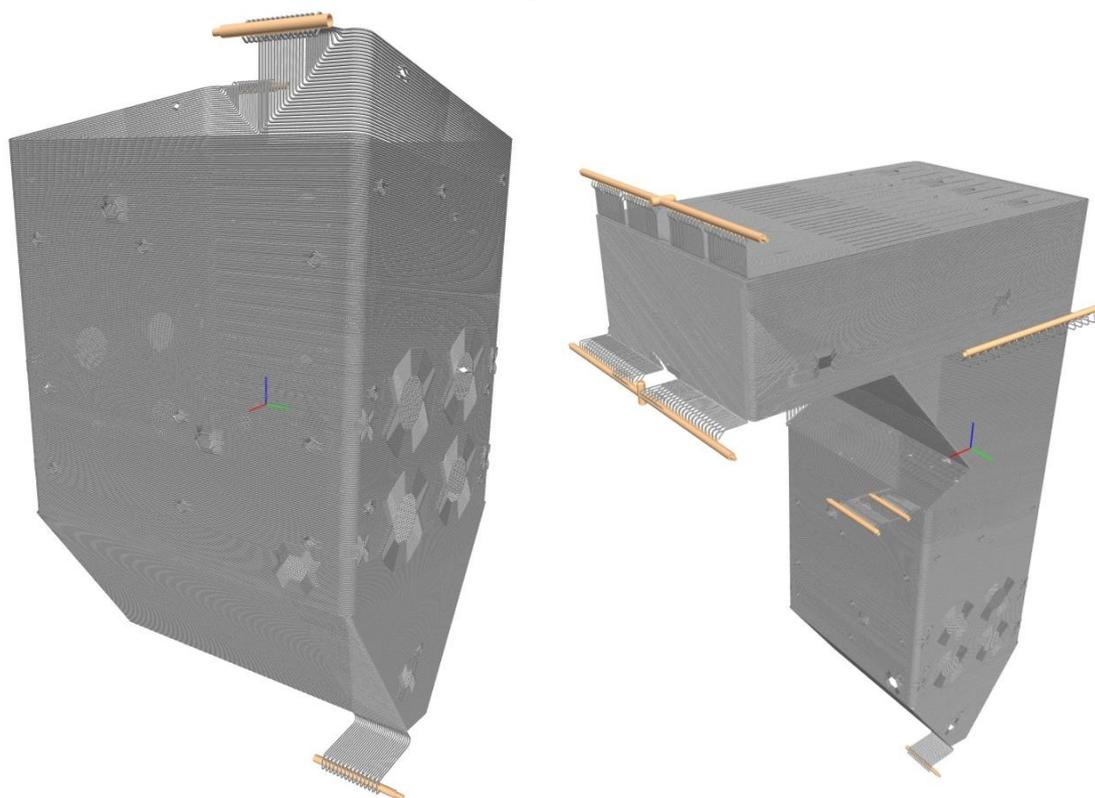


Рис. 9. Сборка зоны НРЧ и полной топки

Принцип трубогиба относительно глобальных координат. Ключевой методологической проблемой при разработке программного обеспечения, основанного на языке последовательных трансформаций «turtle language», является корректное определение операции вращения (гиба) в заданной системе координат. В предложенном подходе каждая последующая трансформация применяется к результату предыдущей, используя накопленную матрицу аффинных преобразований. Это приводит к тому, что операция поворота выполняется в локальной системе координат крайнего преобразования в «turtle language», в то время как исходные данные (например, из проектной документации) заданы, как правило, в глобальной системе.

Для разрешения этого несоответствия возникает математическая задача вывода таких преобразований, которые позволили бы вычислять параметры локального поворота на основе требуемых углов в глобальной системе координат. Итоговая матрица трансформации, полученная произведением вычисленной локальной матрицы на накопленную, должна обеспечивать корректную ориентацию элемента в глобальной системе координат.

Решаемая задача: нахождение локальных углов θ и ϕ , на основе заданных глобально α и β .

Представим результирующую матрицу поворота перед некоторым гибом в виде:

$$MR = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \quad (1)$$

а матрицу с локальными углами, на которую необходимо умножить MR , в виде:

$$M(\hat{\nu}, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta + (1 - \cos \theta)x^2 & (1 - \cos \theta)xy - (\sin \theta)z & (1 - \cos \theta)xz + (\sin \theta)y \\ (1 - \cos \theta)yx + (\sin \theta)z & \cos \theta + (1 - \cos \theta)y^2 & (1 - \cos \theta)yz - (\sin \theta)x \\ (1 - \cos \theta)zx - (\sin \theta)y & (1 - \cos \theta)zy + (\sin \theta)x & \cos \theta + (1 - \cos \theta)z^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Здесь в основу положены уравнения матрицы поворота вокруг произвольной оси, когда ось вращения задана единичным вектором $\hat{\nu} = (x, y, z)$, а угол поворота θ [12].

Для решения поставленной задачи было введено допущение, упрощающее общий случай. Произвольный гиб в трехмерном пространстве был сведен к вращению в плоскости XY, что позволило определить ось вращения как вектор, ортогональный этой плоскости.

Таким образом, компоненты единичного вектора $\hat{\nu} = (x, y, z)$ принимают вид:

$$x = \cos(\phi), y = \sin(\phi), z = 0.$$

Это упрощение позволяет описать направление гiba одним углом ϕ и устраняет необходимость в анализе компонента z , значительно сокращая вычислительную сложность.

Тогда матрица $M(\hat{\nu}, \theta)$ приобретает вид:

$$M(\hat{\nu}, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta + (1 - \cos \theta)x^2 & (1 - \cos \theta)xy & (\sin \theta)y \\ (1 - \cos \theta)yx & \cos \theta + (1 - \cos \theta)y^2 & -(\sin \theta)x \\ -(\sin \theta)y & (\sin \theta)x & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

Результирующая матрица после гiba представлена в формуле 4:

$$M_{res} = MR \cdot M(\hat{\nu}, \theta) \quad (4)$$

Заметим, что в матрице $M(\hat{\nu}, \theta)$ ее третий столбец обладает значительно более простой алгебраической формой по сравнению с первыми двумя. В частности, его элементы не содержат тригонометрических функций в высоких степенях. Следовательно, при матричном умножении $MR \cdot M(\hat{\nu}, \theta)$ элементы результирующего третьего столбца также будут иметь выражения меньшей сложности. Выражения для третьего столбца итоговой матрицы имеют вид:

$$M_{[:,2]}^{res} = \begin{pmatrix} (a \cdot y - b \cdot x) \cdot \sin(\theta) + c \cdot \cos(\theta) \\ (-x \cdot e + d \cdot y) \cdot \sin(\theta) + f \cdot \cos(\theta) \\ (g \cdot y - h \cdot x) \cdot \sin(\theta) + i \cdot \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Представление результирующей матрицы после гiba, но уже в углах Эйлера:

$$M_{res}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma - \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \\ \sin \beta \sin \gamma & \sin \beta \cos \gamma & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

где α, β – углы, заданные глобально.

Поскольку ранее мы условились, что задать положение оси гiba в трехмерном пространстве можно с помощью двух углов, используем для решения уравнения только ячейки с углами прецессии (α) и нутации (β), т.е. ячейки [0,2], [1,2], [0,3].

В результате матричного перемножения получаем компоненты матрицы $M_{[0,2]}^{res}$, $M_{[1,2]}^{res}$, $M_{[2,2]}^{res}$ и приравниваем их к соответствующим компонентам из матрицы $M_{res}(\alpha, \beta, \gamma)$:

$$\begin{cases} \sin \alpha \sin \beta = (a \cdot y - b \cdot x) \cdot \sin(\theta) + c \cdot \cos(\theta) \\ -\cos \alpha \sin \beta = (-x \cdot e + d \cdot y) \cdot \sin(\theta) + f \cdot \cos(\theta) \\ \cos \beta = (g \cdot y - h \cdot x) \cdot \sin(\theta) + i \cdot \cos(\theta) \end{cases} \quad (7)$$

Прямое аналитическое решение для угла φ путем немедленной подстановки $x = \cos(\varphi)$ и $y = \sin(\varphi)$ в уравнения системы приводит к тригонометрическим выражениям высокой сложности, что делает этот подход нерациональным.

Для обхода этой сложности был предложен альтернативный, поэтапный подход к решению системы. На первом этапе компоненты единичного вектора x и y рассматриваются, как независимые неизвестные, наряду с углом θ .

Окончательный вывод формулы для локальных углов содержит компоненты результирующей матрицы поворота предыдущего гйба, для этого присвоим каждому компоненту свой индекс.

Таблица 2. Разложение финальной матрицы поворота предыдущего гйба на ее компоненты

Индекс	Строка матрицы	Столбец матрицы
A	0	0
B	0	1
C	0	2
D	1	0
E	1	1
F	1	2
G	2	0
H	2	1
I	2	2

В результате выводим из этого уравнения углы θ и ϕ :

Угол θ :

$$\theta = -\arccos \left(\frac{((G \cdot E - D \cdot H) \cdot \sin(\alpha) + (B \cdot G - A \cdot H) \cdot \cos(\alpha)) \cdot \sin(\beta)}{(A \cdot I - C \cdot G) \cdot E + (C \cdot D - A \cdot F) \cdot H + B \cdot F \cdot G - B \cdot D \cdot I} + \frac{(B \cdot D - A \cdot E) \cdot \cos(\beta)}{(A \cdot I - C \cdot G) \cdot E + (C \cdot D - A \cdot F) \cdot H + B \cdot F \cdot G - B \cdot D \cdot I} \right) + \pi \quad (8)$$

Угол ϕ :

$$\phi = \arcsin \left(\frac{B \cdot \frac{(\cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) + F \cdot \cos(\theta))}{\sin(\theta)} + E \cdot \frac{\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) - C \cdot \cos(\theta)}{\sin(\theta)}}{E \cdot A - B \cdot D} \right) \quad (9)$$

Таким образом, используя операции гйба трубы в двух плоскостях, мы можем перейти из локальной системы координат (полученную в результате накопления матрицы аффинных преобразований) в глобальную, которой необходимо пользоваться инженеру, работающему с чертежами.

Обсуждение результатов. Основными результатами работы являются разработанный программный инструментарий и методология, обеспечивающие автоматизированную генерацию детализированных BIM-моделей котельных агрегатов ТЭС. Ключевое преимущество предложенного подхода заключается в создании не просто визуальных копий, а топологически корректных моделей, готовых для последующего инженерного анализа (CAE) и использования в BIM-цикле [13], а также открывает перспективы использования описательного языка моделей для автоматизированной генерации управляющих программ для CNC bending machine. Принцип работы ЧПУ трубогиба заключается в автоматической

обработке трубы с высокой точностью с помощью числового программного управления (ЧПУ). Сначала труба фиксируется, а затем гидравлическая или электромеханическая система перемещает формовочные ролики и инструменты, изгибая её по заранее заданной программе на языке G-code, в которой указаны все параметры: уголгиба, радиус, расстояние. G-code – условное именование языка программирования устройств с числовым программным управлением (ЧПУ). Учитывая структурное и семантическое сходство между языком трансформаций, используемым в нашей программе (“turtle language”), и языком G-code, разработка конвертера для перевода инструкций моделирования в команды ЧПУ является технически реализуемой задачей без существенных сложностей. Таким образом, предлагаемый подход позволяет эффективно интегрировать управление жизненным циклом продукта с непосредственным производством компонента.

Центральным элементом разработанной методологии является использование последовательных трансформаций и булевых операций над стандартизованными графическими примитивами. Такой подход позволяет с высокой точностью и гибкостью воссоздавать сложные элементы котлоагрегата.

Ярким примером служит моделирование рекуперативного воздухоподогревателя (РВП). В отличие от стандартных трубных блоков, для “куба” РВП вводится дополнительная координатная ось, что позволяет размещать трубы с независимым шагом по осям X и Y, точно отражая их реальное пространственное расположение. Важнейший конструктивный элемент – трубная доска – моделируется путем трансформации примитива “Куб” до требуемых габаритов. Последующее применение булевой операции вычитания позволяет автоматически сгенерировать точную сетку отверстий для развальцовки труб (рисунок 10).

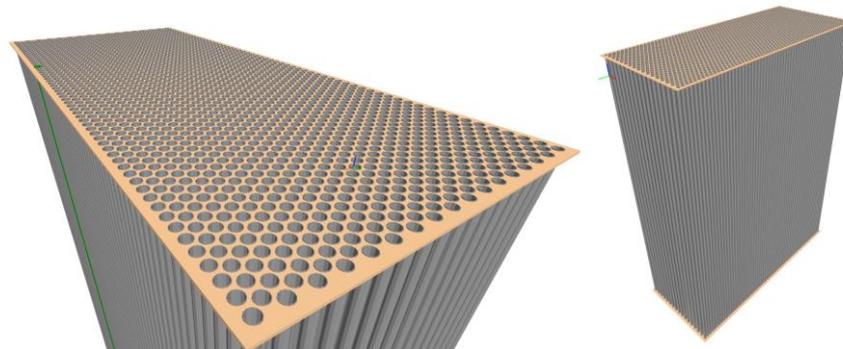


Рис. 10. 3D модель РВП с демонстрацией трубной доски и отверстий

Этот же универсальный принцип – применение булевых операций для создания отверстий – используется при моделировании коллекторов поверхностей нагрева (рисунок 11), что подтверждает гибкость и масштабируемость предложенного метода.

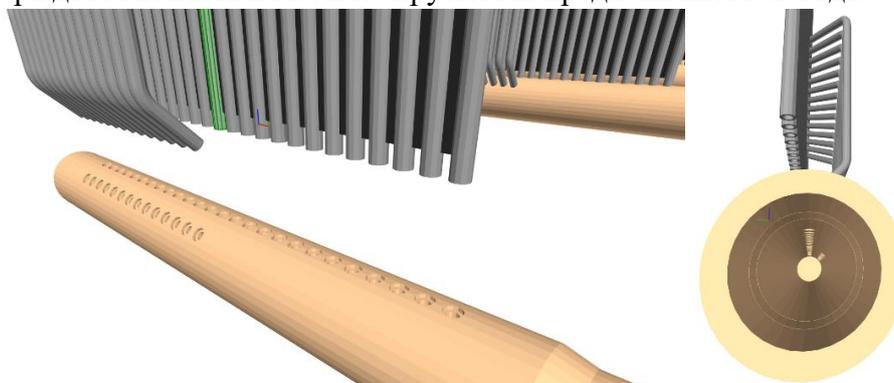


Рис. 11. Демонстрация отверстий в коллекторе в результате применения булевой операции

Помимо этого, инструментарий позволяет формировать блоки поверхностей нагрева из набора отдельных труб, что предусмотрено специальным синтаксисом библиотеки. Это

необходимо для корректного моделирования сложных разводов, которые в реальности выполняются не из цельной трубы, а собираются из отдельных сегментов. Благодаря этому модель точно отражает реальную конструкцию узла (рис. 12).



Рис. 12. Создание блоков поверхностей нагрева из составных труб

Высокая степень детализации и корректность сопряжений элементов (стыков, соединений) (рис. 13) позволяют использовать сгенерированные модели в качестве полноценной основы для моделирования технологических процессов. Модели готовы для импорта в CAE-системы, такие, как ANSYS, без необходимости дополнительной доработки геометрии. Это открывает возможности для решения широкого круга инженерных задач:

1. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов под воздействием температурных и механических нагрузок.
2. Оценка и прогнозирование статистики отказов поверхностей нагрева.
3. Повышение надежности и устойчивости работы котлоагрегата за счет выявления “узких мест” на этапе проектирования или модернизации.

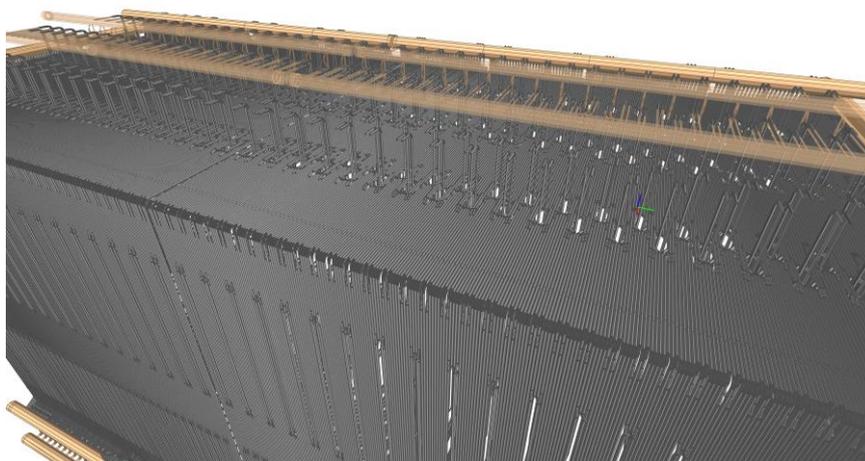


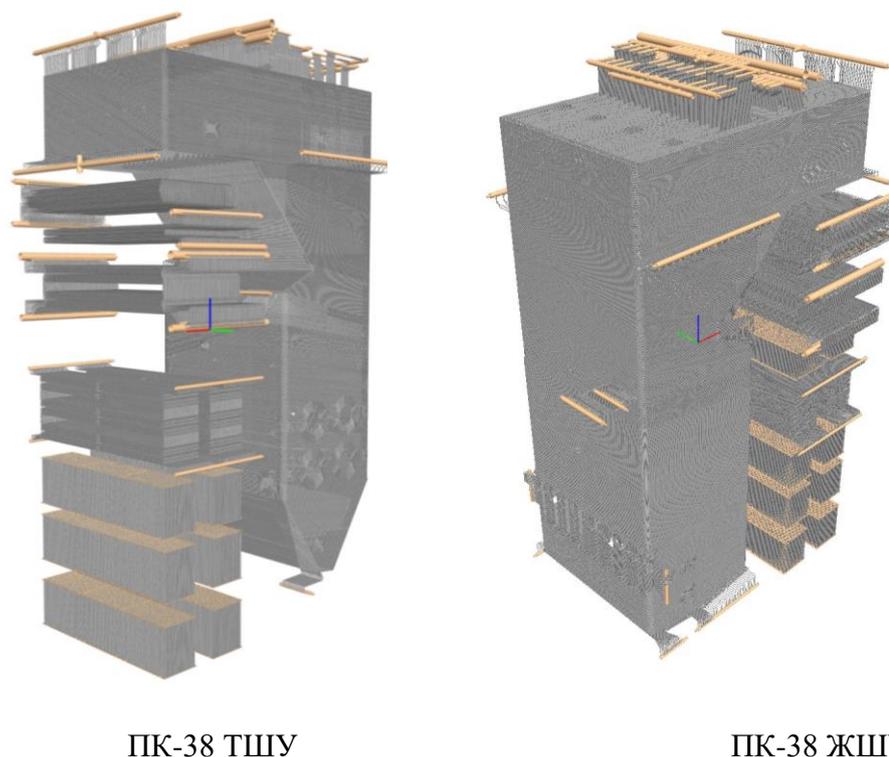
Рис. 13. Обширная сеть разводов труб в потолочном пароперегревателе

Также концепция «массива труб», как специфической геометрии, помимо котельной техники может найти применение во многих отраслях производства. Так, например, эта библиотека может быть применена для создания трубных поверхностей

использующихся в химической, пищевой промышленности, в системах отопления и др.

Помимо инженерных расчетов, созданные BIM-модели являются ценным ресурсом для визуализации. Они могут быть использованы в IFC-совместимых программах просмотра для создания интерактивных ремонтных карт, разработки учебных материалов и тренажеров для обслуживающего персонала, а также для планирования монтажных и демонтажных работ. На

рисунке 14 представлены полномасштабные модели котлов ПК-38 с различными системами шлакоудаления, полностью сгенерированные с помощью разработанного инструментария.



ПК-38 ТШУ

ПК-38 ЖШУ

Рис. 14. 3D модели котла, полученная в результате описания геометрии на языке последовательных трансформаций

Заключение. В выполненной работе была успешно решена актуальная научно-практическая задача по автоматизации процесса создания детализированных BIM-моделей поверхностей нагрева котельных агрегатов ТЭС – элемента, на который, согласно статистике, приходится до 70% всех отказов энергоблоков.

В отличие от традиционных подходов, основанных на «ручном» моделировании в коммерческих САПР, была предложена и реализована оригинальная концепция алгоритмической генерации геометрии. Для этого разработан специализированный язык последовательных трансформаций («turtle language»), который формализует описание сложной пространственной геометрии труб на основе данных проектной документации. Практическая реализация концепции выполнена в виде программной библиотеки «IFC_for_TPP» на языке Python, с использованием open-source библиотеки IfcOpenShell.

Ключевые научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана и обоснована методология алгоритмического BIM-моделирования, которая преодолевает ограничения стандартных программных продуктов при работе со специфической геометрией теплоэнергетического оборудования. Показано, что данный подход кардинально снижает трудоемкость по сравнению с ручным моделированием.
2. Предложен практический программный инструментарий, позволяющий на основе параметрического описания автоматически генерировать сложные узлы котла: от отдельных трубных блоков и коллекторов до комплексных сборок, таких, как топочные экраны, пароперегреватели, РВП и т.д.
3. Полученные BIM-модели в стандартном формате IFC обладают высокой степенью детализации и топологической корректностью. Они являются не конечным продуктом, а готовой основой для решения прикладных инженерных задач: проведения прочностных

и тепловых расчетов в САЕ-системах (ANSYS), планирования ремонтов, а также создания интерактивных обучающих материалов.

4. Сформулирована и обоснована концепция интеграции разработанных моделей в архитектуру «цифрового двойника». Показано, что создаваемая BIM-модель выступает в роли фундаментального компонента комплексной информационной системы, предназначенной для управления жизненным циклом актива, анализа рисков и предиктивного технического обслуживания.

Таким образом, представленная работа вносит существенный вклад в развитие методов цифровизации теплоэнергетической отрасли. Предложенный инструментарий является масштабируемым и эффективным решением для создания ключевого элемента цифровых двойников – высокоточной информационной модели оборудования, что открывает новые возможности для повышения надежности и эффективности эксплуатации котельных агрегатов ТЭС.

Список источников

1. Салов И.В. Применение цифровых двойников и киберфизических систем на объектах генерации тепловой и электрической энергии / И.В. Салов, И.А. Щербатов, Ю.А. Салова // INTERNATIONAL JOURNAL OF OPEN INFORMATION TECHNOLOGIES, 2022. – №3. – С. 57-62.
2. Куприяновский В.П. Цифровые двойники на базе развития технологий BIM, связанные онтологиями, 5G, IoT и смешанной реальностью для использования в инфраструктурных проектах и IFRABIM / В.П. Куприяновский, А.А. Климов, Ю.Н. Воропаев и др. // INTERNATIONAL JOURNAL OF OPEN INFORMATION TECHNOLOGIES, 2020. – №3. – С. 55-72.
3. Еремин А.В. Общие сведения о применении визуального проектирования при BIM проектировании / А.В. Еремин, А.В. Седова, Ф.М. Абрамов и др. // Высокие технологии в строительном комплексе, 2024. – №1. – С. 12-14.
4. Бойко Е.А. Риск-ориентированное управление техническим состоянием технологического оборудования тепловых электростанций / Е.А. Бойко, А.В. Бобров, П.В. Шишмарев и др. // Сибирский федеральный университет. – Красноярск: ИПЦ СФУ, 2021. – 352 с.
5. Молчанова С.М. BIM как инструмент информационного моделирования при реализации проектов в строительной отрасли / С.М. Молчанова // Международный научно-исследовательский журнал, 2024. – №7 (145). – С. 1-4. – DOI: 10.60797/IRJ.2024.145.180.
6. Merz, K., Chabaud V., Garcia-Rosa P.B., Kolle K. A hierarchical supervisory wind power plant controller, Journal of Physics: Conference Serie, 2018, DOI:10.1088/1742-6596/2018/1/012026.
7. Кусмарцева С.Е. Применение BIM-и CFD-моделей для разработки инженерных решений / С.Е. Кусмарцева, А.С. Мальчугов, Р.И. Хазиев и др. // Энергетик, 2024. – №10. – С. 45-47.
8. Бойко Е.А. Система диагностики и управления техническим состоянием объектов теплоэнергетики на основе цифровых двойников / Е.А. Бойко, К.В. Лебедев // Энергобезопасность и энергосбережение, 2024. – №3. – С. 74-85.
9. Воропай Н.И. ИТ-инфраструктура для построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов / Н.И. Воропай, Л.В. Массель, И.Н. Колосок и др. // Известия РАН. Энергетика, 2021. – №1. – С. 3-13.
10. Конопацкий Е.В. Геометрическое представление элементов строительных конструкций в формате IFC / Е.В. Конопацкий, М.В. Безсолюнов, Н.Д. Чучмар // Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2025. – Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры. – С. 122-128.
11. Свидетельство № 2025663784 Российская Федерация, Роспатент. Программа автоматизированного проектирования BIM-моделей котельных агрегатов ТЭС: № 2025661600: заявл. 13.05.2025: опубл. 30.05.2025 / Бойко Е. А., Лебедев К. В., Бобров А.В., Куличкин А.П., Лойко В.П.; заявитель СФУ. – 10 с.
12. Balakrishnan, V. How is a Vector Rotated, Resonance Journal of Science Education, 1999, v.4, pp. 61-68.
13. Горшков А.М. Внедрение BIM технологий в строительство / А.М. Горшков, С.А. Железнов, Р.А. Лемешко и др. // Alfabuild, 2019. – №4 (11). – С 70-81.

Лебедев Константин Викторович. Аспирант кафедры тепловых электрических станций политехнического института Сибирского федерального университета. AuthorID: 1227626, SPIN: 5984-7783, ORCID 0009-0006-3653-8330. klebedev@sfu-kras.ru. Россия, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26.

Бойко Евгений Анатольевич. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых электрических станций политехнического института Сибирского федерального университета. Термический анализ углей, способы подготовки и сжигания твердых органических топлив, математическое моделирование теплоэнергетических процессов и устройств. AuthorID: 41902, SPIN: 6048-9742, ORCID: 0009-0007 8278-0854. eboiko@sfu-kras.ru. Россия, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26.

Куличкин Алексей Павлович. Аспирант кафедры тепловых электрических станций политехнического института Сибирского федерального университета. AuthorID: 1320519, SPIN: 9061-9799, ORCID: 0009-0004-7767-123X. akulichkin@sfu-kras.ru. Россия, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26.

Лойко Владимир Павлович. Инженер кафедры тепловых электрических станций политехнического института Сибирского федерального университета. AuthorID: 1311748, SPIN: 3832-9954, ORCID 0009-0005-1740-8277. VLoiko@sfu-kras.ru. Россия, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26.

Бобров Алексей Васильевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций политехнического института Сибирского федерального университета. Теплоэнергетика, электроэнергетика, возобновляемые источники энергии. AuthorID: 74282, SPIN: 9291-0753, ORCID: 0009-0009-5200-6301. avbobrov@sfu-kras.ru. Россия, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26.

Новицкий Дмитрий Александрович. Кандидат физико-математических наук, ООО «Сибирская генерирующая компания», Руководитель направления оптимизационного моделирования и стандартов. AuthorID: 25909, SPIN: 7365-7630, ORCID: 0000-0002-2830-0406. NovitskiiDA@sibgenco.ru. Россия, 115054, г. Москва, Дубининская, 53с5.

Посохов Юрий Михайлович. Кандидат технических наук, ООО «Сибирская генерирующая компания», руководитель направления моделирования систем и ИИ. Искусственный интеллект, кибер-физические системы. AuthorID: 413774, SPIN: 5717-8951, ORCID: 0000-0002-3570-4337. PosokhovIuM@sibgenco.ru. Россия, 115054, г. Москва, Дубининская, 53с5.

UDC 004.41:620.4:620.9

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.008

Algorithmic BIM modeling of steam boiler heating surfaces of power plants

Konstantin V. Lebedev¹, Evgeny A. Boiko¹, Aleksey P. Kulichkin¹, Vladimir P. Loiko¹, Aleksey V. Bobrov¹, Dmitry A. Novitsky², Yuri M. Posokhov²

¹Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, klebedev@sfu-kras.ru

²Siberian Generating Company LLC, Russia, Moscow

Abstract. The article presents the experience of creating BIM models of thermal power plant boilers, as well as the features of modeling individual elements of a boiler unit. It examines the failure statistics of thermal power equipment and provides a comparative analysis of various boiler equipment elements and heating surfaces. Based on these data, a comparative assessment of the reliability of various boiler unit elements was carried out, which justifies the relevance of detailed modeling of heating surfaces. It is shown that the BIM model is not an end product, but an integral component of a comprehensive information system. In this regard, a concept for integrating the developed models into the structure of a “digital twin” for use in life cycle management and maintenance systems for energy assets is proposed. The technological and algorithmic aspects of creating models for each heating surface and node are described. An algorithmic approach to constructing the geometry of boiler equipment elements is proposed, based on the formalization of modeling operations in the form of a specialized language of sequential transformations (“turtle language”). This language describes a sequence of operations for stretching, rotating, and spatially transforming pipe elements, which allows the complex spatial configuration of heating surfaces to be reproduced based on parametric data from the design documentation. The practical implementation of the approach is carried out in the form of a software library in Python using open tools for forming IFC models, ensuring compatibility with BIM environments and engineering analysis systems. The paper presents a mathematical apparatus for coordinate transformation and algorithms for transitioning from local coordinate systems to a global model system, ensuring correct positioning of elements during sequential transformations. The

developed toolkit allows automatic generation of detailed three-dimensional models of boiler units, suitable for subsequent use in CAE calculations, equipment condition monitoring systems, repair planning, and personnel training. The results obtained demonstrate the effectiveness of the proposed approach and its potential for use in the creation of digital twins of thermal power facilities and the development of equipment condition monitoring systems.

Keywords: BIM modeling, heating surfaces, boiler unit, digital twin, solid modeling, asset management, electronic repair form

References

1. Salov I.V., Shcherbatov I.A., Salova J.A. Primenenie cifrovyyh dvoynikov i kiberfizicheskikh sistem na ob'ekтах generacii teplovoj i elektricheskoy energii [Application of digital twins and cyber-physical systems at thermal and electric power generation facilities]. INTERNATIONAL JOURNAL OF OPEN INFORMATION TECHNOLOGIES, 2022, no. 3, pp. 57-62.
2. Kupriyanovskij V.P., Klimov A.A., Voropaev J.N. et al. Cifrovye dvoyniki na baze razvitiya tekhnologiy BIM, svyazannye ontologiyami, 5G, IoT i smeshannoy real'nost'yu dlya ispol'zovaniya v infrastrukturyh proektah i IFRABIM [Digital twins based on the development of BIM technologies, linked by ontologies, 5G, IoT and mixed reality for use in infrastructure projects and IFRABIM]. INTERNATIONAL JOURNAL OF OPEN INFORMATION TECHNOLOGIES, 2020, no. 3, pp. 55-72.
3. Eremin A.V., Sedova A.V., Abramov F.M. et al. Obshchie svedeniya o primeneniі vizual'nogo proektirovaniya pri BIM proektirovaniі [General information about the application of visual design in BIM design]. High technologies in the construction complex, 2024, no. 1, pp. 12-14.
4. Boiko E.A., Bobrov A.V., Shishmarev P.V. et al. Risk-orientirovannoe upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem tekhnologicheskogo oborudovaniya teplovyh elektrostancij [Risk-based management of the technical condition of process equipment at thermal power plants]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2021, 352 p.
5. Molchanova S.M. BIM kak instrument informacionnogo modelirovaniya pri realizacii proektov v stroitel'noj otrasli [BIM as a tool for information modeling in the implementation of projects in the construction industry]. International research journal, 2024, no. 7 (145), pp. 1-4, DOI: 10.60797/IRJ.2024.145.180.
6. Merz, K., Chabaud V., Garcia-Rosa P.B., Kolle K. A hierarchical supervisory wind power plant controller, Journal of Physics: Conference Serie, 2018. – DOI: 10.1088/1742-6596/2018/1/012026.
7. Kusmarceva S.E., Mal'chugov A.S., Haziev R.I. et al. Primenenie BIM-i CFD-modelej dlya razrabotki inzhenernyh reshenij [Using BIM and CFD models to develop engineering solutions]. Energetik, 2024, no. 10, pp. 45-47.
8. Boiko E.A., Lebedev K.V. Sistema diagnostiki i upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem ob'ektov teploenergetiki na osnove cifrovyyh dvoynikov [Digital twin-based system for diagnostics and control of thermal power equipment]. Energy security and energy saving, 2024, no. 3, pp. 74-85.
9. Voropaj N.I., Massel' L.V., Kolosok I.N., Massel' A.G. IT-infrastruktura dlya postroeniya intellektual'nyh sistem upravleniya razvitiem i funkcionirovaniem sistem energetiki na osnove cifrovyyh dvoynikov i cifrovyyh obrazov [IT infrastructure for building intelligent systems for managing the development and operation of energy systems based on digital twins and digital images]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy, 2021, no. 1, pp. 3-13.
10. Konopackij E.V., Bezsol'nov M.V., Chuchmar N.D. Geometricheskoe predstavlenie elementov stroitel'nyh konstrukcij v formate IFC [Geometric representation of building structure elements in IFC format], Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Sankt-Peterburg, 2025) [Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Saint Petersburg, 2025)]. Saint Petersburg, 2025, pp. 122-128.
11. Boiko E.A., Lebedev K.V., Bobrov A.V. et al. Programma avtomatizirovannogo proektirovaniya BIM-modelej kotel'nyh agregatov TES [BIM-modeling software for thermal power plant boiler units]. Certificate Rossiiskaia Federatsiia no. 2025663784 (2025).
12. Balakrishnan, V. How is a Vector Rotated, Resonance Journal of Science Education, 1999, v.4, pp. 61-68.
13. Gorshkov A.M., Zhelezov S.A., Lemeshko R.A. et al. Vnedrenie BIM tekhnologij v stroitel'stvo [Implementation of BIM technologies in construction]. Alfabuild, 2019, no. 4 (11), pp. 70-81.

Lebedev Konstantin Viktorovich. Postgraduate student at the Department of Thermal Power Plants at the Polytechnic Institute of the Siberian Federal University. AuthorID: 1227626, SPIN: 5984-7783, ORCID 0009-0006-3653-8330. klebedev@sfu-kras.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Kirensky, 26.

Boiko Evgeny Anatolyevich. Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Thermal Power Plants Department at the Polytechnic Institute of Siberian Federal University. Thermal analysis of coals, methods of preparation and combustion of solid organic fuels, mathematical modeling of thermal energy processes and devices. AuthorID: 41902, SPIN: 6048-9742, ORCID: 0009-0007 8278-0854. eboiko@sfu-kras.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Kirensky, 26.

Kulichkin Aleksey Pavlovich. Postgraduate student in the Department of Thermal Power Plants at the Polytechnic Institute of Siberian Federal University. AuthorID: 1320519, SPIN: 9061-9799, ORCID: 0009-0004-7767-123X. akulichkin@sfu-kras.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Kirensky, 26.

Loiko Vladimir Pavlovich. Engineer in the Department of Thermal Power Plants at the Polytechnic Institute of Siberian Federal University. AuthorID: 1311748, SPIN: 3832-9954, ORCID: 0009-0005-1740-8277. VLoyko@sfu-kras.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Kirensky, 26.

Bobrov Aleksey Vasilyevich. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Thermal Power Plants at the Polytechnic Institute of Siberian Federal University. Thermal power engineering, electric power engineering, renewable energy sources. AuthorID: 74282, SPIN: 9291-0753, ORCID: 0009-0009-5200-6301. avbobrov@sfu-kras.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Kirensky, 26.

Novitsky Dmitry Aleksandrovich. Siberian Generating Company LLC, PhD in Physics. Head of optimization modelling and standards. AuthorID: 25909, SPIN: 7365-7630, ORCID: 0000-0002-2830-0406. NovitskiiDA@sibgenco.ru. Russia, Moscow, Dubininskaya str., 53c5.

Posokhov Yuri Mikhailovich. Siberian Generating Company LLC, PhD in Engineering. Head of System Modelling and AI. Artificial Intelligence, cyber-physical systems, quantitative structure-property relationships. AuthorID: 413774, SPIN: 5717-8951, ORCID: 0000-0002-3570-4337. PosokhovIuM@sibgenco.ru. Russia, Moscow, Dubininskaya str., 53c5.

Статья поступила в редакцию 10.10.2025; одобрена после рецензирования 20.10.2025; принята к публикации 06.02.2026.

The article was submitted 10/10/2025; approved after reviewing 10/20/2025; accepted for publication 02/06/2026.

Цифровая экономика и управление

УДК 004.7:658.512

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.009

Совершенствование управления жизненным циклом информационной инфраструктуры предприятия на основе агрегированной оценки с учётом структуры и критичности компонентов

Улыбин Тимофей Тимофеевич

Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск, *timoxasem@mail.ru*

Аннотация. В статье представлена методика совершенствования управления жизненным циклом информационной инфраструктуры предприятия (ИИП), основанная на логико-аксиологическом подходе и теории агрегированных систем. Данная методика представляет собой инновационный инструмент, позволяющий учитывать сложную иерархическую структуру ИИП, нелинейные взаимозависимости между её компонентами и многоуровневую категоризацию критичности оборудования. В отличие от традиционных методик, оперирующих линейными свёртками, такими, как взвешенное среднее, предлагаемый подход базируется на нелинейном агрегировании, реализуемом в рамках нечёткой логики. Целевая функция, разработанная на основе понятий «дефицита функциональности» и «ценности компонента», учитывает вероятностные характеристики компонентов и их критичность для функционирования системы. Для оборудования категории К1 применяется агрегирование по принципу необходимости (с использованием функции \max), что обеспечивает максимальную надёжность системы. Категория К3 характеризуется агрегированием по принципу достаточности, минимизирующим избыточные затраты. Категория К2 предполагает смешанное агрегирование, основанное на вероятностном объединении, что позволяет гибко адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. Данный подход позволяет идентифицировать критические компоненты ИИП, отказ которых может привести к полной потере функциональности системы. Это обеспечивает высокую интерпретируемость управленческих решений и позволяет лицам, принимающим решения (ЛПР), обоснованно выбирать стратегии управления (эксплуатация, ремонт или замена). Методика может быть интегрирована в систему поддержки принятия решений (СППР) и цифровой двойник ИИП, что повышает её практическую применимость и адаптивность к динамично меняющимся условиям эксплуатации. Для демонстрации корректности и эффективности предложенного подхода приведены примеры расчётов для критически важного сервера управления движением поездов (категория К1) и сетевого коммутатора (категория К2). Результаты включают формализованную онтологическую модель ИИП, адаптированную под требования ГОСТ Р 53114-2008, что подтверждает её соответствие нормативным требованиям и высокую степень детализации. Проведённые расчёты демонстрируют, что предложенный подход значительно повышает обоснованность, интерпретируемость и безопасность управленческих решений в условиях высокой неопределённости и критической зависимости от надёжности информационной инфраструктуры предприятия.

Ключевые слова: информационная инфраструктура предприятия, жизненный цикл, агрегированная оценка, логико-аксиологический подход, онтология, экспертная система

Цитирование: Улыбин Т.Т. Совершенствование управления жизненным циклом информационной инфраструктуры предприятия на основе агрегированной оценки с учётом структуры и критичности компонентов / Т.Т. Улыбин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 123-135 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.009.

Введение. Управление жизненным циклом информационной инфраструктуры предприятия (ИИП) представляет собой одну из ключевых задач в условиях стремительной цифровой трансформации. В соответствии с результатами исследований [1], ИИП является сложной, динамичной и высоко интегрированной системой, где отказ одного элемента может инициировать цепную реакцию, приводя к остановке критически важных бизнес-процессов и значительным финансовым потерям. В условиях нарастающей сложности и взаимозависимости компонентов ИИП, разработка эффективных методов управления становится первостепенной задачей для обеспечения устойчивости и непрерывности функционирования предприятий.

В современной практике управления ИИП применяются различные методологические подходы, каждый из которых обладает своими преимуществами и ограничениями.

1. Процессно-ориентированные модели управления, такие как ITIL (Information Technology Infrastructure Library) и COBIT (Control Objectives for Information and Related Technologies), представляют собой наиболее распространённые методологии, обеспечивающие структурированное управление информационными технологиями и связанными с ними активами [2]. Эти подходы охватывают ключевые этапы жизненного цикла информационных и коммуникационных технологий, включая планирование, эксплуатацию, мониторинг и непрерывное улучшение. Однако, несмотря на широкое применение, эти модели имеют ряд ограничений. Они носят качественный и процедурный характер, что не позволяет проводить количественную оценку функциональности информационных и коммуникационных технологий. Кроме того, отсутствие структурно-зависимой оценки затрудняет учёт внутренней иерархии компонентов и их взаимосвязей. Также эти модели не позволяют адекватно отразить критические зависимости между элементами системы. Однако в настоящее время управление активами всё чаще осуществляется в соответствии со стандартом ISO 55000 [3], который предполагает системный учёт рисков, обеспечение надёжности и анализ стоимости жизненного цикла.

2. Системы класса ERP (Enterprise Resource Planning) и CMMS (Computerized Maintenance Management System), такие, как SAP EAM, IBM Maximo, Oracle EAM представляют собой инструменты для управления активами и планирования технического обслуживания и ремонта (ТОиР) [4]. Эти системы позволяют вести учёт активов, планировать ТОиР, рассчитывать жизненный цикл стоимости (LCC) и управлять заявками на обслуживание. Однако, несмотря на их функциональность, они также обладают рядом ограничений, такими, как ограниченная способность к объективной, количественной и предиктивной поддержке решений в условиях высокой неопределённости [5], игнорирование многокритериальности задачи принятия решений, что затрудняет адаптацию к специфике критичности различных типов оборудования, а также недостаточная гибкость в адаптации к специфическим требованиям и особенностям критичности различных типов.

3. Методы многокритериального оценивания, такие, как метод анализа иерархий (АНР) [6], свёртки на основе среднего арифметического или геометрического [7], а также интеграл Шоке [8] и другие, широко используются для агрегации критериев, таких, как LCC, надёжность и риск. Эти методы позволяют учитывать множество факторов при принятии решений. Однако, они также обладают следующими ограничениями – это линейный или квазилинейный характер, не позволяющий адекватно отразить нелинейные зависимости между компонентами системы, невозможность полного учёта структуры системы, что приводит к «размыванию» влияния критически важных активов при использовании средних значений и отсутствию дифференциации в учёте критичности компонентов, что снижает точность и интерпретируемость результатов.

4. Подходы на основе цифровых двойников представляют собой перспективное направление, позволяющее создавать виртуальные копии физических активов и прогнозировать их состояние. Цифровые двойники [1, 9] обладают потенциалом для улучшения мониторинга и симуляции, однако большинство реализаций сосредоточены на этих аспектах и не включают встроенной логики принятия решений [10]. Таким образом, несмотря на их преимущества, цифровые двойники также требуют дальнейшего развития и интеграции с другими методологическими подходами.

Таким образом, существующие подходы к управлению ИИП не обеспечивают комплексного решения фундаментальной задачи: объективной оценки функциональности ИИП с учё-

том её иерархической структуры, зависимостей между компонентами и категорий критичности оборудования. В условиях нарастающей сложности и динамичности ИИП, разработка новых методов, учитывающих эти аспекты, становится актуальной и востребованной задачей.

В настоящей работе предлагается новая целевая функция, основанная на логико-аксиологическом подходе [11] и теории агрегируемых систем [12, 13]. Эта целевая функция обладает следующими преимуществами:

1. Учёт структуры ИИП через онтологическую модель, что позволяет адекватно отразить иерархическую природу системы.
2. Поддержка ключевых компонентов, обеспечивая значение функции близкое или равное 1 для критически важных активов.
3. Применение агрегирования по необходимости для К1 (критически важные компоненты), по достаточности для К3 (некритические компоненты) и смешанное агрегирование для К2 (компоненты средней критичности).
4. Обеспечение интерпретируемости управленческих решений, что способствует повышению прозрачности и обоснованности принимаемых решений.

Предложенная целевая функция представляет собой инновационный подход к управлению ИИП, позволяющий учесть сложные структурные и функциональные аспекты системы, а также обеспечить объективность и интерпретируемость принимаемых решений.

Теоретические основы. Согласно теории агрегируемых систем [14], любая система с неубывающим или невозрастающим законом агрегирования, чья функциональность определяется состоянием компонентов, подчиняется одному из трёх типов агрегирования:

- 1) по необходимости: утрата функциональности системы происходит при утрате всех компонентов из необходимого подмножества (их утрата влечёт утрату функциональности системы в целом независимо от состояния других частей системы);
- 2) по достаточности: функциональность системы обеспечивается, если функционируют все компоненты из достаточного подмножества (то есть, для функционирования системы достаточно, чтобы функционировали хотя бы эти компоненты);
- 3) смешанное: присутствуют оба типа подмножеств.

Для ИИП ОАО «РЖД» характерны все три типа оборудования:

К1-оборудование (источники питания, серверы управления движением и другие) характеризуется агрегированием по необходимости;

К3-оборудование (рабочие станции) – характеризуются агрегированием по достаточности;

К2 – характеризуются смешанным агрегированием.

Ключевым инструментом является понятие ценности компонента $v_i \in [0,1]$ – мера влияния дефицита функциональности компонента i на дефицит функциональности содержащего его надкомпонента. При $v_i = 1$ компонент i является ключевым для своего надкомпонента [14, 15]. Надкомпонент представляет собой структурный элемент системы, занимающий более высокий уровень в иерархической конфигурации и включающий в себя один или несколько элементов, расположенных на субкомпонентном уровне. Таким образом, если элемент C_i является составной частью элемента C' , то C_i классифицируется как субкомпонент (или подкомпонент), а C' выполняет роль надкомпонента по отношению к C_i . Эта иерархическая структура позволяет эффективно организовывать и систематизировать компоненты системы, обеспечивая их функциональную взаимосвязанность и координацию.

Составной частью обсуждаемой здесь методики является онтологическая модель информационной инфраструктуры предприятия (ИИП), разработанная в рамках логико-аксиологи-

ческого подхода [14]. Она представляет собой иерархическую структуру компонентов, отражающую технологическую, управленческую и функциональную организацию ИИП и служит основой для построения специальной продукционной базы знаний, предназначенной для последующего агрегированного оценивания функциональности системы.

Целью онтологии является формализовать состав ИИП как системы, отношения между компонентами (включение, подчинение, влияние), категории критичности (К1-К3), роли компонентов в обеспечении функциональности всей ИИП.

В онтологии можно выделить три уровня абстракции: высший – система в целом, средний – подсистемы, такие, как система управления движения поездов (СУДП), сетевая инфраструктура, системы хранения данных (СХД), системы бесперебойного питания (СБП), системы кондиционирования, рабочие станции и прочее, а также низший уровень, представленный функциональными элементами, такими, как серверы, коммутаторы и коммутационное оборудование.

Иерархическая структура информационной инфраструктуры предприятия (ИИП) – это многоуровневая, вложенно-подчинённая организация компонентов, отражающая технологическую, функциональную и управленческую логику функционирования ИИП, как агрегируемой системы. Она служит основой для построения онтологической модели, продукционной базы знаний и последующего агрегированного оценивания в рамках логико-аксиологического подхода.

Иерархия ИИП представляет собой структуру, которая строится по принципу «сверху вниз», от целого (ИИП) к его составным частям (подсистемам и функциональным элементам). Этот процесс предполагает движение от общего к частному, от абстрактных целей к конкретным техническим элементам. Тип агрегирования определяется для каждого уровня иерархии независимо, в зависимости от структуры подсистемы и её роли в надкомпоненте.

Иерархическая структура ИИП позволяет в системе поддержки принятия решения формализовать зависимости между компонентами, выявлять ключевые активы (К1) и назначать им приоритет, применять разные типы агрегирования в зависимости от категории и обеспечить интерпретируемость: лицо, принимающее решение, видит, почему рекомендуется та или иная стратегия.

Представленная структура представляет собой иерархическую онтологическую модель информационной инфраструктуры предприятия (ИИП), построенную на основе принципов системного анализа и агрегированного оценивания. Модель отражает функциональную и технологическую организацию ИИП, как сложной системы, где состояние целого определяется состоянием его компонентов.

Разработанная онтологическая модель является примером легкой онтологии, структурированной в виде графа, где концепты предметной области функционируют как узлы, а отношения между ними представлены в виде дуг. В рамках данной модели используется единственный тип отношения – «входит в» (включение), который отражает иерархическую принадлежность компонента к более высокоуровневой подсистеме.

Методологической основой данной методики является логико-аксиологический подход [11], который акцентирует внимание на формализации причинно-следственных связей посредством продукционных правил. Ключевым аспектом данного подхода является не сложность структуры, а способность системы генерировать интерпретируемые результаты. Применение единственного типа связи «входит в» позволяет:

1. Сформировать строго иерархическую структуру, которая напрямую транслируется в систему продукционных правил вида «Если дефицит компонента (C_i), то дефицит надкомпонента (C')». Это обеспечивает прозрачность логического вывода и интерпретируемость результатов.

2. Избежать избыточной сложности, которая не влияет на расчет агрегированного показателя. Как показано в исследовании [13], для целей агрегированной оценки достаточно использовать «лёгкие» онтологии, где основное внимание уделяется структурной принадлежности, а не множеству семантических связей [18, 19].

3. Обеспечить соответствие методологии построения продукционной базы знаний. Каждая дуга на графе (рис. 1) интерпретируется как логическое утверждение «Компонент (C_i) является составной частью компонента (C')», что соответствует продукционному правилу ($\neg C_i \rightarrow \neg C'$) и позволяет рассчитывать агрегированные показатели посредством нечеткого вывода.

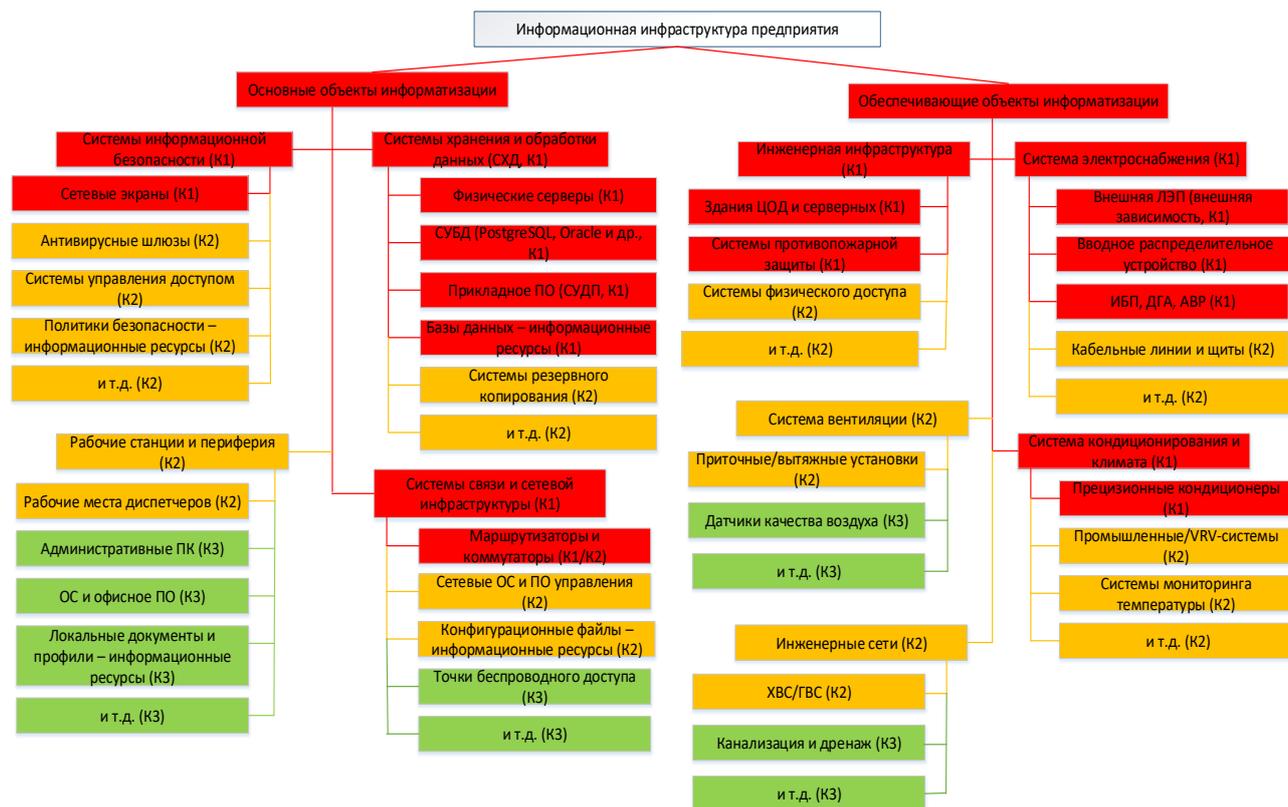


Рис. 1. Иерархическая структура ИИП

Таким образом, использование единственного типа отношения «входит в» представляет собой не упрощение, а осознанный методологический выбор, направленный на достижение основной цели исследования: построение интерпретируемой и математически корректной модели для оптимизации управления жизненным циклом оборудования на основе агрегированной оценки.

Данный метод, акцентирующий внимание на физических активах, как составляющих элементах структуры и обеспечения ИИП в соответствии с [16], предоставляет достаточную семантическую выразительность для целей комплексной оценки жизненного цикла оборудования, сохраняя при этом лёгкость формализации и ясность логических заключений.

Отличительной чертой данной модели от традиционных подходов является то, что она строится в соответствии с [17] и охватывает все компоненты информационной инфраструктуры предприятия. В модель включены как основные объекты информатизации, такие, как серверы, системы управления данными и системы хранения данных, так и обеспечивающие объекты, такие, как источники бесперебойного питания, системы кондиционирования, здания и линии электропередач. Особое внимание в модели уделяется физическим активам, поскольку цель исследования заключается в управлении жизненным циклом оборудования. Кроме того, в модели чётко выделены категории критичности, обозначенные как K1, K2 и K3,

с использованием цветовой кодировки. Это позволяет применять соответствующий тип агрегирования данных: по необходимости для К1, по достаточности для К3 и смешанный для К2, в строгом соответствии с теорией агрегируемых систем.

Модель разработана по принципу «от общего к частному» и состоит из трёх уровней. На первом уровне находится основной концепт, который представляет собой систему в целом (ИИП). Целевое значение $\|ИИП\|$ определяется, как совокупная оценка всех функций ИИП.

Величина $\|A\|$ представляет собой меру истинности утверждения $A =$ «Компонент X исправен» (функционален полностью); $\|A\|$ при этом интерпретируется, как количественный показатель, характеризующий состояние (функциональность) компонента системы. К примеру, значение $\|A\| = 1$ указывает на полную истинность утверждения, что свидетельствует о полной функциональной исправности и соответствии компонента установленным требованиям. В случае $\|A\| = 0$ утверждение о функциональности (исправности) является полностью ложным, что может означать утрату компонента, его неисправность или несоответствие заданным параметрам. При этом значение $\|A\| = 0,85$ интерпретируется как «частично истинное утверждение», что, например, может отражать уровень надежности компонента, равный 85%.

Цветовая маркировка соответствует уровню критичности и определяет тип объединения данных: красный (К1) – объединение по необходимости, оранжевый (К2) – смешанное объединение, зелёный (К3) – объединение по достаточности.

Необходимо отметить, что системы обеспечения, являясь ключевыми элементами структуры, играют интегративную роль в функционировании всех подсистем ИИП, включая К1-оборудование. Компоненты структуры представляют собой элементы, совокупная утрата которых приводит к прекращению функционирования надкомпонента. В контексте систем обеспечения, особенно источников энергоснабжения и систем кондиционирования, данное условие приобретает еще более критическое значение: утрата одного компонента системы обеспечения влечет за собой не только утрату самого компонента, но и полное прекращение функционирования связанных с ним подсистем, включая системы хранения данных и системы управления.

На первом уровне рассматриваются подсистемы ИИП, и в работе выделено пять основных групп. Эти первичные подсистемы представляют собой подсистемы верхнего уровня, которые могут оцениваться независимо друг от друга. Связи между ИИП и подсистемами построены по принципу включения, что позволяет рассматривать их как единое целое.

В соответствии с теорией агрегируемых систем [12], каждая подсистема является надкомпонентом для своих нижележащих элементов. Её состояние $\|S_i\|$ зависит от состояния её компонентов C_j по некоторому закону агрегирования $U(C_1, \dots, C_n)$.

На втором уровне находятся функциональные элементы и технические устройства, которые составляют подсистему. Например, в подсистеме «СХД» (К1) серверы (К1, красный) играют роль ключевых компонентов, а виртуализационные хосты (К2, оранжевый) относятся к обеспечивающим элементам. В подсистеме «Рабочие станции и периферия» (К3, зелёный) принтеры, сканеры и многофункциональные устройства (К3, зелёный) также являются обеспечивающими компонентами, что означает, что их ценность ниже единицы.

Если ключевой компонент системы выйдет из строя, то за ним последует сбой или прекращение работы надкомпонента. Например, если серверы баз данных перестанут функционировать, то это приведёт к проблемам с системой хранения информации, что, в свою очередь, повлечёт за собой полную потерю функциональности информационной инфраструктуры предприятия. Формализованное описание этого явления выглядит следующим образом:

$$\|\neg\text{Сервер}\| = 1 \Rightarrow \|\neg\text{СХД}\| = 1 \Rightarrow \|\neg\text{ИИП}\| = 1 \quad (1)$$

Роль обеспечивающего компонента заключается в обеспечении надёжной работы вышестоящего компонента, но при этом он не является обязательным. Например, состояние принтеров не влияет на движение поездов.

Каждая из категорий (K1, K2, K3) определяет тип агрегирования, которое применяется к соответствующему оборудованию. В рамках теории агрегируемых систем [12], следует отметить, что K1-оборудование характеризуется необходимостью обязательного наличия компонентов. В случае, когда хотя бы один из ключевых компонентов системы полностью утрачивает свою функциональность, что соответствует $\|K_i\| = 0$, это неизбежно приводит к полной потере функциональности всей интегрированной информационной и исполнительной системы (ИИП), что выражается в $\|K'\| = 0$. Данный принцип является фундаментальным для понимания надёжности и безопасности функционирования сложных технических систем, где критическая зависимость от отдельных компонентов может существенно влиять на общую производительность и стабильность системы. Это соответствует определению необходимого подмножества.

Оборудование категории K2 часто содержит как ключевые, так и вспомогательные компоненты. При проведении агрегации по критерию достаточности достаточно, чтобы хотя бы один элемент из подмножества, обладающего требуемыми свойствами, функционировал.

На основе данной онтологии сформирована продукционная база знаний на K1-оборудовании, что позволяет продемонстрировать ключевые элементы методологии, а именно, продукционные правила вида $\neg K_i \rightarrow \neg K'$, ценность компонентов, агрегирование по необходимости и выявление ключевого компонента.

Каждое правило имеет вид:

$$\neg K_i \rightarrow \neg K' \tag{2}$$

где K_i – компонент, K' – надкомпонент, $\|\neg K_i \rightarrow \neg K'\| = v_i$ – ценность K_i для K' .

Разберём пример применения данной методологии на оборудовании информационно-вычислительного центра.

Базу знаний (систему продукций) удобнее представить в табличном виде (таблица 1).

Таблица 1. База знаний

№	Антеcedент $\neg K_1$	Консеквент $\neg K'$	Ценность $\ \neg K_i \rightarrow \neg K'\ $	Обоснование
1	\neg Процессор	\neg Сервер СУДП	1,0	Ключевой компонент
2	\neg ОЗУ	\neg Сервер СУДП	0,9	Критически важный
3	\neg RAID – массив	\neg Сервер СУДП	1,0	Ключевой компонент
4	\neg Сетевые интерфейсы	\neg Сервер СУДП	0,8	Важный, но не ключевой
5	\neg Сервер СУДП	\neg СХД	1,0	Ключевой компонент
6	\neg СХД	\neg ИИП	1,0	Ключевой компонент

В таблице 1, где ценность равна 1, означает, что в случае выхода из строя компонента надкомпонент полностью утрачивает свою функциональность. Далее положим, что аудитор дал оценки функциональности субкомпонентам (таблица 2).

Таблица 2. Оценки функциональности

Компонент	$ K_i $	$ \neg K_i = 1 - K_i $
Процессор	0,999	0,001
ОЗУ	0,99	0,01
RAID-массив	0,95	0,05

С целью расчёта дефицита функциональности сервера СУДП для каждого правила применяем нечёткий *modus ponens* по формуле (3). Результаты сведены в таблицу 3.

$$\|\neg K'\|_i = \|\neg K_i\| \cdot \|\neg K_i \rightarrow \neg K'\| \quad (3)$$

Таблица 3. Результаты расчёта дефицита функциональности

Компонент	$\ \neg K_i\ \cdot \ \neg K_i \rightarrow \neg K'\ $	$\ \neg K'\ _i$
Процессор	$1,0 \cdot 0,001$	0,001
ОЗУ	$0,9 \cdot 0,01$	0,009
RAID-массив	$1,0 \cdot 0,05$	0,05
Сетевые интерфейсы	$0,8 \cdot 0,0$	0,0

Так как сервер относится к К1-оборудованию, используется агрегирование по необходимости. Функцией объединения будет \max .

$$\|\neg \text{Сервер СУДП}\| = \max(0,001; 0,009; 0,05; 0,0) = 0,05 \quad (4)$$

$$\|\text{Сервер СУДП}\| = 1 - 0,05 = 0,95 \quad (5)$$

Соответственно, расчёт дефицита СХД и ИИП будет представлен в следующем виде:

$$\|\neg \text{СХД}\| = 0,05 \cdot 1,0 = 0,05 \rightarrow \|\text{СХД}\| = 0,95 \quad (6)$$

$$\|\neg \text{ИИП}\| = 0,05 \cdot 1,0 = 0,05 \rightarrow \|\text{ИИП}\| = 0,95 \quad (7)$$

Исходя из полученных данных, можно прийти к выводу, что основной причиной ухудшения ИИП в данном примере является RAID-массив, который характеризуется дефицитом в 0,05. Это позволяет лицу, принимающему решение, понять, почему оценка именно такая, и определить, какие меры необходимо предпринять в первую очередь для улучшения ситуации.

В контексте управления жизненным циклом ИИП выделяются три ключевых критерия, определяющих состояние физического актива:

1. Экономический критерий, выраженный через среднегодовую стоимость жизненного цикла (LCC), измеряемую в млн. рублей в год. Логика этого критерия заключается в том, что чем ниже стоимость жизненного цикла, тем лучше.
2. Критерий надёжности, определяемый через вероятность безотказной работы актива в течение заданного периода. Чем выше этот показатель, тем выше надёжность актива.
3. Критерий риска или ожидаемого ущерба от отказа актива, измеряемый в миллионах рублей в час. Чем ниже этот показатель, тем меньше риск и, следовательно, лучше.

Все три критерия имеют разную размерность и смысл, поэтому их необходимо привести к единому диапазону значений. В процессе нормализации значение 1 соответствует идеальному состоянию, а 0 – полной потере функциональности.

В рамках логико-аксиологического подхода [11] агрегирование осуществляется не на основе показателей, характеризующих функциональность, как это принято в традиционных подходах, а по дефицитам функциональности – то есть мерам отклонения от идеального состояния.

Для каждого компонента вводится параметр, который характеризует его функциональность и измеряется в диапазоне от 0 до 1. В соответствии с этим параметром определяется недостаток (дефицит) функциональности:

$$\|K\| \in [0,1] \quad (8)$$

$$\|\neg K\| = 1 - \|K\| \quad (9)$$

В отношении основных критериев недостаток функциональности экономического критерия и критерия надёжности определяется по формуле (9). Однако критерий риска уже является по своей природе дефицитным, поэтому его инвертирование не требуется.

$$\|\neg C\| = 1 - C_{norm} \quad (10)$$

$$\|\neg R\| = 1 - R_{norm} \quad (11)$$

$$\|\neg Risk\| = Risk_{norm} \quad (12)$$

Во всех случаях построение агрегата основывается на дефицитах, а не на непосредственных оценках. Такой подход позволяет корректно обрабатывать ключевые элементы, при необходимости осуществлять агрегацию, а также избегать компенсации. Последнее означает, что низкая надёжность не может быть восполнена за счёт снижения затрат.

Экспертно определены веса для критериев в зависимости от категории актива $v_C^{(k)}$, $v_R^{(k)}$, $v_{Risk}^{(k)}$ и представлены в таблице 4.

Таблица 4. Вес критерия актива

Категория	v_C	v_R	v_{Risk}
К1	0,2	0,5	0,3
К2	0,3	0,5	0,2
К3	0,5	0,4	0,1

Частные вклады будут определены по следующим формулам:

$$d_C = \|\neg C\| \cdot v_C \quad (13)$$

$$d_R = \|\neg R\| \cdot v_R \quad (14)$$

$$d_{Risk} = \|\neg Risk\| \cdot v_{Risk} \quad (15)$$

С целью определения наилучшего решения по управлению жизненным циклом информационной инфраструктуры предприятия необходимо провести объединение дефицитов в зависимости от категории оборудования, как показано:

для К1-оборудования (по необходимости):

$$\|\neg F\| = \max(d_C, d_R, d_{Risk}) \quad (16)$$

для К2-оборудования (смешанное):

$$\|\neg F\| = 1 - (1 - d_C)(1 - d_R)(1 - d_{Risk}) \quad (17)$$

для К3-оборудования (по достаточности):

$$\|\neg F\| = \frac{d_C + d_R + d_{Risk}}{3} \quad (18)$$

В таком случае итоговая функциональность будет определена по формуле:

$$\|F\| = 1 - \|\neg F\| \in [0, 1] \quad (19)$$

Далее приведен пример расчета для сервера, который обеспечивает процесс управления движением поездов (К1-оборудование).

Результаты нормализации критериев представлены в таблице 5.

Таблица 5. Нормализация критериев актива

Критерий	Стратегия 1	Стратегия 2	Стратегия 3
C_{norm}	1,0	0,57	0,0
R_{norm}	0,9997	0,9998	0,9999
$Risk_{norm}$	1,0	0,73	0,0

В таком случае дефициты будут представлены следующие:

- Стратегия 1: $d_R = \|\neg R\| \cdot v_R = (1 - 0,9997) \cdot 0,2 = 0,00015$
- Стратегия 2: $d_{Risk} = \|\neg Risk\| \cdot v_{Risk} = 0,73 \cdot 0,3 = 0,219$
- Стратегия 3: $d_C = \|\neg C\| \cdot v_C = 1,0 \cdot 0,2 = 0,2$

Объединение дефицитов проведено для К1-оборудования, то есть:

- Стратегия 1: $\|\neg F\| = \max(0; 0,00015; 0) = 0,00015 \rightarrow \|F\| = 0,99985$
- Стратегия 2: $\|\neg F\| = \max(0,43; 0,00005; 0,219) = 0,43 \rightarrow \|F\| = 0,57$
- Стратегия 3: $\|\neg F\| = 0,2 \rightarrow \|F\| = 0,8$

Наилучшей стратегией при данном расчёте будет продолжение эксплуатации, проведение капитального ремонта не требуется, а надёжность близка к идеальной и риск компенсируется резервированием.

Также представлен пример расчета для сетевого коммутатора (К2-оборудование).

Дефициты представлены в таблице 6.

Таблица 6. Дефициты по критериям

Стратегия	d_R	d_{Risk}	d_C
1	0,0	0,09	0,2
2	0,08	0,048	0,097
3	0,2	0,003	0,0

Объединение дефицитов проведено для К1-оборудования, то есть:

- Стратегия 1: $\|\neg F\| = 1 - 1 \cdot 0,91 \cdot 0,8 = 0,272 \rightarrow \|F\| = 0,728$
- Стратегия 2: $\|\neg F\| = 1 - 0,92 \cdot 0,952 \cdot 0,903 = 0,208 \rightarrow \|F\| = 0,792$
- Стратегия 3: $\|\neg F\| = 1 - 0,8 \cdot 0,997 \cdot 1 = 0,2024 \rightarrow \|F\| = 0,7976$

Наилучшей стратегией при данном расчёте будет проведение замены оборудования, так как надёжность достаточно низкая, а стоимость жизненного цикла на текущий момент высокая.

Заключение. В рамках данного исследования была разработана методика оптимизации процессов управления жизненным циклом информационной инфраструктуры предприятия (ИИП), базирующаяся на принципах логико-аксиологического подхода и теории агрегируемых систем. Анализ существующих моделей показал, что традиционные методы, основанные на линейных свёртках, не обеспечивают адекватного учёта сложной структуры ИИП и критичности её компонентов. В качестве альтернативы предложено использование нелинейной целевой функции, учитывающей дефициты и ценности компонентов, что позволяет идентифицировать ключевые активы и обеспечивает высокую интерпретируемость управленческих решений. Предложенная целевая функция может служить ядром цифрового двойника, как это предложено в работах [9, 20].

Методика была успешно интегрирована в систему поддержки принятия решений и адаптирована к специфическим требованиям информационно-вычислительного центра ОАО «РЖД». Это позволило достичь основной цели исследования – создания научно обоснованного инструмента для разработки оптимальной стратегии управления физическими активами. Полученные результаты обладают как теоретической, так и практической значимостью, способствуя повышению обоснованности, безопасности и эффективности управленческих решений в условиях высокой неопределённости и динамичности внешней среды.

Список источников

1. Son Y.H., Kim G.Y., Kim H.C. et al. Past, present, and future research of digital twin for smart manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 1–23, DOI: 10.1093/jcde/qwab067
2. ITIL Foundation: ITIL 4 Edition. AXELOS, 2019. Available at: <https://www.axelos.com/certifications/itil-service-management/itil-4-foundation> (accessed: 05/15/2025).
3. ISO 55000:2024. Asset management – Overview, principles and terminology. URL: <https://www.iso.org/standard/85776.html> (дата обращения: 05/15/2025).
4. ISACA. COBIT 2019 Framework. ISACA, 2018. Available at: <https://www.isaca.org/resources/cobit> (accessed: 05/15/2025).
5. Управление техническим состоянием железнодорожной инфраструктуры: учеб. пособие / под ред. А.Н. Рахмангулова. – М.: УМЦ ЖДТ, 2020. – 288 с.
6. Ye W., Ren J., Zhang P. et al. Review of integrated full life cycle data management and application of the slab tracks. *Intelligent Transportation Infrastructure*, 2022, vol. 1, no. 1, pp. 1–14, DOI: 10.1093/iti/liac018.
7. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, 1980, 287 p.
8. Субетто А.И. Оценочные средства и технологии аттестации качества подготовки специалистов в вузах / А.И. Субетто. – СПб.: Исследовательский центр проблем качества, 2004. – 68 с.
9. Ахаев А.В. Метод выбора программного продукта на основе интеграла Шоке / А.В. Ахаев, И.А. Ходашинский, А.Е. Анфилофьев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2014. – № 2(32). – С. 224–229.

10. Tao F., Qi Q., Liu A. et al. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. 653–661, DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014
11. Han S. A review of smart manufacturing reference models based on the skeleton meta-model. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2020, vol. 7, no. 3, pp. 323–336, DOI:10.1093/jcde/qwaa027
12. Аршинский Л.В. Логико-аксиологический подход к оценке состояния систем / Л.В. Аршинский // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2013. № 3(39). С. 140-146.
13. Аршинский Л.В. Необходимость и достаточность при агрегировании на основе неубывающих функций / Л.В. Аршинский, В.Л. Аршинский // *Онтология проектирования*. 2022. Т. 12, № 1. С. 93-105.
14. Аршинский Л.В. Необходимость и достаточность в задачах агрегирования для невозрастающих функций / Л.В. Аршинский, В.Л. Аршинский // *Актуальные проблемы прикладной дискретной математики: сб. науч. тр. Вып. 9 / под ред. О.В. Кузьмина. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2023. С. 8-18.*
15. Аршинский Л.В. Учет компонентов структуры и компонентов влияния при логико-аксиологической оценке систем / Л.В. Аршинский // *Информационные и математические технологии в науке и управлении: тр. XX Байкальской Всерос. конф. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. С. 7-12.*
16. Аршинский Л.В. Построение агрегированных оценок систем как логический вывод на алгебраических сетях / Л.В. Аршинский, Е.А. Асламова, А.Ю. Попов // *Информационные и математические технологии в науке и управлении: тр. XXI Байкальской Всерос. конф. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2016. – С. 12-18.*
17. ГОСТ Р 53114-2008 Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. Основные термины и определения
18. Gruber T.R. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 1993, vol. 5, no. 2, pp. 199–220, DOI: 10.1006/knac.1993.1008.
19. Noy N.F., McGuinness D.L. *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*. Stanford Knowledge Systems Laboratory, 2001.
20. Grieves M. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. White Paper, 2014.

Улыбин Тимофей Тимофеевич. Ассистент преподавателя кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения. AuthorID: 1230947, SPIN: 9750-3220, ORCID 0009-0005-2024-8737, timoxasem@mail.ru, Россия, Иркутск, Чернышевского, 15.

UDC 004.7:658.512

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.009

Improving the lifecycle management of an enterprise's information infrastructure based on an aggregated assessment, taking into account the structure and criticality of the components

Timofey T. Ulybin

Irkutsk state transport university,
Russia, Irkutsk, *timoxasem@mail.ru*

Abstract. The article presents a methodology for improving the lifecycle management of an enterprise's information infrastructure based on a logical and axiological approach and the theory of aggregated systems. This technique is an innovative tool that allows taking into account the complex hierarchical structure of the IIP, the nonlinear interdependencies between its components, and the multilevel categorization of equipment criticality. Unlike traditional methods using linear convolutions, such as weighted averages, the proposed approach is based on nonlinear aggregation implemented within the framework of fuzzy logic. The objective function, developed on the basis of the concepts of "functional deficit" and "component value", takes into account the probabilistic characteristics of the components and their criticality for the functioning of the system. For equipment of category K1, aggregation is applied according to the principle of necessity (using the max function), which ensures maximum system reliability. Category K3 is characterized by aggregation based on the principle of sufficiency, minimizing excess costs. The K2 category assumes mixed aggregation based on probabilistic pooling, which allows flexible adaptation to changing operating conditions. This approach makes it possible to identify critical IIP components, the failure of which can lead to a complete loss of system functionality. This ensures high

interpretability of management decisions and allows decision makers to reasonably choose management strategies (operation, repair or replacement). The technique can be integrated into the decision support system (DSS) and the digital twin of the IIP, which increases its practical applicability and adaptability to dynamically changing operating conditions. To demonstrate the correctness and effectiveness of the proposed approach, examples of calculations for a mission-critical train traffic control server (category K1) and a network switch (category K2) are given. The results include a formalized IIP ontological model adapted to the requirements of GOST R 53114-2008, which confirms its compliance with regulatory requirements and a high degree of detail. The calculations performed demonstrate that the proposed approach significantly increases the validity, interpretability and security of management decisions in conditions of high uncertainty and critical dependence on the reliability of the enterprise's information infrastructure.

Keywords: enterprise information infrastructure, life cycle, aggregated assessment, logical and axiological approach, ontology, expert system

References

1. Son Y.H., Kim G.Y., Kim H.C. et al. Past, present, and future research of digital twin for smart manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 1–23, DOI: 10.1093/jcde/qwab067.
2. ITIL Foundation: ITIL 4 Edition. AXELOS, 2019. Available at: <https://www.axelos.com/certifications/itil-service-management/itil-4-foundation> (accessed: 05/15/2025).
3. ISO 55000:2024. Asset management – Overview, principles and terminology. URL: <https://www.iso.org/standard/85776.html> (accessed: 05/15/2025).
4. ISACA. COBIT 2019 Framework. ISACA, 2018. Available at: <https://www.isaca.org/resources/cobit> (accessed: 05/15/2025)
5. Upravleniye tekhnicheskimi sostoyaniyami zheleznodorozhnoy infrastruktury: ucheb. posobiye [Management of the Technical Condition of Railway Infrastructure: Textbook]. Ed. by A.N. Rakhmanqulov. Moscow, UMTs ZhDT Publ., 2020, 288 p.
6. Ye W., Ren J., Zhang P. et al. Review of integrated full life cycle data management and application of the slab tracks. *Intelligent Transportation Infrastructure*, 2022, vol. 1, no. 1, pp. 1–14, DOI: 10.1093/iti/liac018.
7. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, 1980, 287 p.
8. Subetto A.I. Otsenochnyye sredstva i tekhnologii attestatsii kachestva podgotovki spetsialistov v vuzakh [Assessment Tools and Technologies for Quality Certification of Specialist Training in Universities]. Saint Petersburg, Issledovatel'skiy tsentr problem kachestva [Research Center for Quality Problems] Publ., 2004, 68 p.
9. Akhaye A.V., Khodashinsky I.A., Anfilofyev A.Ye. Metod vybora programmogo produkta na osnove integrala Shoke [Method for selecting a software product based on the Choquet integral]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2014, no. 2(32), pp. 224–229.
10. Tao F., Qi Q., Liu A. et al. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison // *Engineering*. 2019. Vol. 5, № 4. P. 653-661.
11. Han S. A review of smart manufacturing reference models based on the skeleton meta-model // *Journal of Computational Design and Engineering*. 2020. Vol. 7, № 3. P. 323-336.
12. Arshinsky L.V. Logiko-aksiologicheskii podkhod k otsenke sostoyaniya sistem [Logical-axiological approach to assessing the state of systems]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2013, no. 3(39), pp. 140–146.
13. Arshinsky L.V., Arshinsky V.L. Neobkhodimost' i dostatochnost' pri agregirovani na osnove neubyvayushchikh funktsiy [Necessity and sufficiency in aggregation based on non-decreasing functions]. *Ontologiya proyektirovaniya* [Ontology of designing], 2022, vol. 12, no. 1, pp. 93–105.
14. Arshinsky L.V., Arshinsky V.L. Neobkhodimost' i dostatochnost' v zadachakh agregirovaniya dlya nevozrastayushchikh funktsiy [Necessity and sufficiency in aggregation problems for non-increasing functions]. In: O.V. Kuzmin (ed.). *Aktual'nyye problemy prikladnoy diskretnoy matematiki: sb. nauch. tr.* [Actual problems of applied discrete mathematics: collection of scientific papers]. Irkutsk, IGU [Irkutsk State University] Publ., 2023, iss. 9, pp. 8–18.
15. Arshinsky L.V. Uchet komponentov struktury i komponentov vliyaniya pri logiko-aksiologicheskoy otsenke sistem [Accounting for structure components and influence components in logical-axiological assessment of systems]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii: tr. XX Baykal'skoy Vseros. konf.* [Information and Mathematical Technologies in Science and Management: Proceedings of the XX Baikal All-Russian Conference]. Irkutsk, ISEM SO RAN [Melentiev Energy Systems Institute SB RAS] Publ., 2015, pp. 7–12.
16. Arshinsky L.V., Aslamova E.A., Popov A.Yu. Postroyeniye agregirovannykh otsenok sistem kak logicheskii vyvod na algebraicheskikh setyakh [Construction of aggregated system assessments as logical inference on

- algebraic networks]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii*: tr. XXI Baykal'skoy Vseros. konf. [Information and Mathematical Technologies in Science and Management: Proceedings of the XXI Baikal All-Russian Conference]. Irkutsk, ISEM SO RAN [Melentiev Energy Systems Institute SB RAS] Publ., 2016, pp. 12–18.
17. GOST R 53114-2008. Zashchita informatsii. Obespecheniye informatsionnoy bezopasnosti v organizatsii. Osnovnyye terminy i opredeleniya [Information protection. Ensuring information security in the organization. Basic terms and definitions]. Introduced 2009-09-01.
18. Gruber T.R. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 1993, vol. 5, no. 2, pp. 199–220, DOI: 10.1006/knac.1993.1008.
19. Noy N.F., McGuinness D.L. *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*. Stanford Knowledge Systems Laboratory, 2001.
20. Grieves M. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. White Paper, 2014.

Ulybin Timofey Timofeevich. *Teaching Assistant at the Department of Information Systems and Information Security at Irkutsk State University of Communication. Author ID: 1230947, SPIN: 9750-3220, ORCID: 0009-0005-2024-8737, timoxasem@mail.ru. Russia, Irkutsk, Chernyshevsky, 15.*

Статья поступила в редакцию 07.11.2025; одобрена после рецензирования 17.12.2025; принята к публикации 16.02.2026.

The article was submitted 11/07/2025; approved after reviewing 12/17/2025; accepted for publication 02/16/2026.

Цифровой портрет регионального развития: анализ грантовых проектов методами LDA и BERTopic

Митрофанова Татьяна Валерьевна, Христофорова Анастасия Владимировна

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,

Россия, Чебоксары, mitrofanova_tv@mail.ru

Аннотация. В статье представлен подход к построению цифрового портрета социально-экономического развития региона на основе автоматизированного анализа текстовых данных. В качестве ключевого индикатора рассматриваются описания грантовых проектов, поддержанных в Республике Марий Эл за 2023–2025 годы. С помощью комбинации методов тематического моделирования – классического LDA и современного нейросетевого BERTopic – выявлены и визуализированы латентные тематические паттерны, формирующие актуальную повестку развития территории. Полученный «портрет» позволяет объективно оценить структуру гражданских инициатив, выявить доминирующие направления (социальная поддержка, развитие человеческого капитала, спорт, образование) и определить их соответствие стратегическим целям региона.

В результате исследования установлено, что смыслообразующим ядром грантовой повестки выступает целевая группа «дети», вокруг которой концентрируются кластеры образовательных, реабилитационных и инклюзивных проектов. LDA-моделирование выделило пять устойчивых тематических направлений, в том числе поддержку семей с детьми и адаптацию лиц с ограниченными возможностями здоровья. BERTopic, в свою очередь, позволил детализировать узкие нишевые практики, например, инклюзивный спорт, реабилитацию людей с нарушениями зрения и культурно-досуговые программы для детей с ОВЗ (ограниченными возможностями здоровья), что подтверждает высокую семантическую чувствительность нейросетевого подхода. Сопоставление полученных тематических кластеров с проектом Стратегии социально-экономического развития Республики Марий Эл выявило как зоны полного совпадения приоритетов (поддержка детства, инклюзия), так и стратегические дисбалансы: слабую представленность проектов в сферах креативных индустрий, туризма и работы с молодёжью. Предложенная методика демонстрирует, что методы машинного обучения открывают новые возможности для мониторинга и диагностики состояния региональных и муниципальных систем, обеспечивая управленческие команды Data-Driven-инструментом для принятия решений и коррекции грантовой политики. Таким образом, тематическое моделирование позволяет перевести массив неструктурированных текстовых данных в плоскость объективного анализа, превращая описание гражданских инициатив в надежный инструмент выявления реальных социальных приоритетов и основу для стратегического планирования.

Ключевые слова: цифровой портрет региона, тематическое моделирование, LDA, BERTopic, управление на основе данных, анализ грантов, региональное развитие, машинное обучение, обработка естественного языка (NLP), Республика Марий Эл

Цитирование: Митрофанова Т.В. Цифровой портрет регионального развития: анализ грантовых проектов методами LDA и BERTopic / Т.В. Митрофанова, А.В. Христофорова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 136-149 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.010.

Введение. Современная парадигма управления региональным развитием все в большей степени опирается на данные и цифровые инструменты, позволяющие перейти от интуитивных оценок к объективному, измеримому анализу состояния территории. В этом контексте формирование комплексного «цифрового портрета» региона, отражающего ключевые тенденции и приоритеты его развития, становится критически важной задачей. Одним из наиболее релевантных, но пока недостаточно изученных источников для построения такого портрета являются текстовые данные, генерируемые в рамках гражданской и проектной активности. В частности, описания грантовых проектов, получающих государственную поддержку, содержат в себе концентрированное выражение актуальных общественных запросов и официальных приоритетов.

Таким образом, цифровой портрет регионального развития представляет собой многомерную тематическую модель социально-экономического состояния территории,

построенную на основе семантического анализа текстовых данных о гражданской и проектной активности. В представляемой работе предлагается методика построения цифрового портрета социально-экономического развития на примере Республики Марий Эл через призму анализа грантовых проектов. В качестве инструментария применяется комбинация двух методов тематического моделирования – латентного размещения Дирихле (LDA) и нейросетевого подхода BERTopic. LDA, будучи классическим и интерпретируемым методом, позволяет выявить устойчивые тематические кластеры в корпусе текстов описаний проектов. BERTopic, использующий современные языковые модели, обеспечивает более глубокое семантическое понимание контекста и позволяет выявить более тонкие и специфичные темы. Синтез этих подходов обеспечивает создание многомерной и достоверной тематической карты региона.

Цель исследования – сформировать и апробировать методику построения цифрового портрета региона на основе текстового анализа данных грантовой поддержки с использованием методов машинного обучения. Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

- выявить латентные тематические структуры в описаниях проектов;
- визуализировать полученные результаты для наглядной интерпретации;
- определить практическую ценность подхода для органов управления региональными и муниципальными системами.

Дополнительной задачей исследования является оценка адекватности полученного цифрового портрета регионального развития. Под адекватностью понимается соответствие выявленных тематических кластеров стратегическим документам региона, приоритетам государственной политики в социальной сфере и фактической структуре распределения грантовой поддержки. Валидность цифрового портрета обеспечивается репрезентативностью данных, применением интерпретируемых моделей тематического анализа и сопоставлением результатов с официальными направлениями развития региона.

Обзор литературы. Методы тематического моделирования стали незаменимыми инструментами для извлечения тематической информации из больших текстовых массивов, особенно в таких областях, как «цифровые гуманитарные науки» (Digital Humanities) и политический анализ [1, 2]. Эти подходы к неконтролируемому машинному обучению облегчают систематическую организацию, понимание и извлечение значимых шаблонов из огромных объемов неструктурированных текстовых данных, где ручной анализ часто непрактичен и неосуществим [3]. Необходимость в таких автоматизированных процедурах обусловлена экспоненциальным ростом объема цифровой информации, что требует надежных алгоритмов, способных распознавать, классифицировать и организовывать информацию, имитируя возможности человека в извлечении и обобщении сложных текстовых наборов данных [2]. Среди известных методов латентное размещение Дирихле и двунаправленные представления кодировщика на основе трансформеров BERT выделяются своими отличными подходами к выявлению скрытых тем в документах. Автор [4] проводит сравнительный анализ современных алгоритмов тематического моделирования коротких текстов, включая LDA, NMF, ETM, ProdLDA, STM, SBMTM и BERTopic, и показывает, что традиционные вероятностные методы хуже работают на коротких сообщениях из-за ограниченного контекста, и обосновывает эффективность сетевых и нейросетевых подходов. LDA, генеративная статистическая модель, предполагает, что документы представляют собой смесь различных тем, каждая из которых характеризуется определенным распределением слов, что позволяет идентифицировать преобладающие темы с помощью шаблонов совпадения слов [5]. BERTopic, наоборот, использует контекстуальные вложения для группировки семантически схожих документов, предлагая более детальное понимание базовых тематических структур за

счет интеграции предварительно подготовленных контекстуальных представлений [6, 7]. Это различие позволяет BERTopic улавливать более сложные семантические взаимосвязи по сравнению с предположением LDA о наборе слов, что может быть особенно полезно в сложных и развивающихся областях, таких, как региональное развитие [1].

В общем виде цифровой профиль региона понимается, как совокупность его типологических особенностей в цифровой сфере, определяющих количественные и качественные характеристики цифровых ресурсов и цифровых потребностей [8]. В статье А.А. Былинской [9] рассматриваются методологические подходы к формированию цифрового профиля российских регионов на основе оценки цифрового спроса и предложения. Особое внимание уделено проблеме цифрового неравенства: различия между регионами объясняются преимущественно уровнем человеческого капитала и стимулирующими политиками, а не экономическими ресурсами. В статье [10] предложен метод выделения ключевых факторов среди экономических, социальных и цифровых процессов российских регионов, позволяющий выявить основные тенденции их развития. Автор акцентирует внимание на необходимости комплексного подхода к анализу региональных характеристик, учитывающего взаимодействие различных факторов.

Как показали в исследовании авторы [11], применение методов корреляционно-регрессионного анализа позволяет выявить ключевые факторы, определяющие динамику валового регионального продукта (ВРП), и построить высококачественные прогнозные модели для субъектов Центрального федерального округа.

В работе [12] демонстрируется создание информационной системы для анализа социально-экономического развития, что требует решения задач сбора, нормализации и агрегации данных из множества официальных и экспертных источников, включая Федеральную службу государственной статистики, ВЦИОМ, рейтинги Ассоциации инновационных регионов России и материалы исследовательских проектов. Авторами был реализован ETL-процесс, обеспечивающий приведение данных к единому стандарту и их последующее использование для моделирования. В контексте нашего исследования, посвященного построению цифрового портрета регионального развития Республики Марий Эл, аналогичный подход применяется для формирования корпуса текстовых данных из описаний грантовых проектов.

Предложенная авторами [13] методика основана на индексном методе и аддитивных моделях и позволяет проводить сравнительный анализ регионов по уровню внедрения «сквозных» цифровых технологий. Однако подобные системы оценки опираются преимущественно на количественные статистические показатели, нормативно закрепленные в стратегиях цифровой трансформации.

В работе [14] показано, что «важным инструментом анализа является применение... отзывов предпринимателей об условиях ведения бизнеса в регионе», а также подчеркивают важность «активности местных органов власти» и «поддержки малого и среднего бизнеса».

Анализ грантов позволяет перейти от внешней оценки к внутренней диагностике, построив цифровой портрет Марий Эл не через призму статистических показателей, а через призму его собственных стратегических устремлений и проектных инициатив.

Методология. В качестве источника данных был подготовлен датасет с информацией о проектах-победителях грантовых конкурсов в Республике Марий Эл за период, начиная с первого грантового конкурса 2023 года, по второй конкурс 2025 года. Данные представлены в формате Microsoft Excel и включают сведения о проектах, поддержанных Фондом президентских грантов (таблица 1).

Таблица 1. Основные поля датасета

Поле	Описание
Название проекта	Полное название поддержанного проекта
Организация	Организация, получившая финансирование
Сумма гранта	Размер предоставленного гранта в рублях
Год	Год проведения конкурса (2023, 2024, 2025)
Тематика	Тематическое направление проекта
Краткое описание	Краткое описание содержания проекта

Объектом исследования выступает корпус текстов, содержащих краткие описания проектов-победителей региональных грантовых конкурсов в Республике Марий Эл за 2023–2025 годы. Исходные данные были собраны в виде таблицы Excel и включают информацию о названии проекта, его кратком описании, годе проведения, размере поддержки и тематике.

Для анализа текстов использовались методы обработки естественного языка, включая очистку текстов от стоп-слов и пунктуации, нормализацию (приведение к нижнему регистру), векторизацию с помощью CountVectorizer.

Для лингвистической нормализации текстов использовалась лемматизация с применением библиотеки Stanza. Выбор был обусловлен тем, что, в отличие от простых словарных подходов rymorphy2, Mystem, Stanza использует обученные нейросетевые модели, демонстрирующие более высокую точность в разрешении морфологических амбиграмм, особенно в контексте социальных и проектных текстов.

Применяется комбинированный подход к тематическому моделированию, сочетающий классический метод LDA и современный нейросетевой подход BERTopic. Такой синтез методов позволяет максимально полно выявить тематическую структуру описаний грантовых проектов. LDA был выбран благодаря своей прозрачности, хорошей интерпретируемости результатов и удобству визуализации с использованием pyLDAvis. В то же время BERTopic, основанный на трансформерных моделях, обеспечивает более глубокий семантический анализ и лучше учитывает контекстные взаимосвязи между словами.

Для проверки адекватности цифрового портрета была проведена комплексная оценка, включающая сопоставление выделенных тематических кластеров с официальными направлениями Стратегии социально-экономического развития Республики Марий Эл [15], анализ согласованности результатов, полученных с использованием моделей LDA и BERTopic, а также количественную оценку долей тематических кластеров. Дополнительно была выполнена экспертная интерпретация выделенных тем, основанная на анализе практики реализации социально-ориентированных проектов в регионе, что позволило подтвердить содержательную релевантность полученных результатов.

Результаты. В результате тематического моделирования было выявлено пять основных тем, каждая из которых характеризуется набором ключевых слов, отражающих содержание соответствующей группы проектов (Таблица 2).

Таблица 2. Выявленные темы в результате LDA

№	Тема	Ключевые слова	Интерпретация
1.	Индивидуальные занятия и развитие детей	ребенок, занятие, провести, развитие, специалист, коррекция, индивидуальный, бесплатный, курс	Тема отражает направления деятельности, связанные с организацией индивидуальных и коррекционных занятий, направленных на развитие детей. В центре внимания – работа специалистов, проведение бесплатных курсов и развитие персонализированных программ обучения. Подобные практики характерны для образовательных и социально-реабилита-

			ционных учреждений, ориентированных на поддержку детей с особыми образовательными потребностями.
2.	Образовательные и развивающие мероприятия для детей	ребенок, развитие, занятие, навык, человек, марий, мероприятие, участие, организация	Тематика объединяет широкий спектр мероприятий, направленных на формирование и развитие когнитивных, коммуникативных и социальных навыков у детей. Особое место занимают развивающие занятия и образовательные инициативы, реализуемые как на уровне отдельных организаций, так и в рамках региональных программ. Акцент делается на участии различных социальных субъектов и активном вовлечении детей в образовательный процесс.
3.	Мероприятия и поддержка людей с инвалидностью	инвалид, мероприятие, зрение, республика, марий, проведение, физический, общество	Тематика характеризуется упором на проведение мероприятий, ориентированных на людей с инвалидностью, включая лиц с нарушениями зрения и другими ограничениями по здоровью. Особое внимание уделяется деятельности общественных организаций и республиканских структур, которые обеспечивают проведение специализированных мероприятий и развитие инклюзивной среды. Это свидетельствует о формировании устойчивой системы поддержки данной категории населения.
4.	Социальная поддержка семей с детьми	ребенок, семья, помощь, социальный, республика, поддержка, родитель, реализация	Данная тема охватывает различные формы социальной помощи и поддержки, предоставляемые семьям с детьми. В неё входят инициативы по оказанию психологической, материальной и организационной помощи, а также меры государственной и региональной политики. Тематика подчёркивает важность участия семьи в программах поддержки и реализацию комплексного подхода к обеспечению благополучия детей.
5.	Игровые и творческие программы для детей с ОВЗ	игра, овз, команда, участник, количество, творческий, мероприятие, город	Тематика отражает организацию игровых, творческих и командных мероприятий, адаптированных для детей с ограниченными возможностями здоровья. Подобные практики способствуют развитию социальных навыков, раскрытию творческого потенциала и интеграции детей в коллектив. Проведение таких мероприятий, как правило, осуществляется на уровне муниципальных и общественных инициатив, что свидетельствует о расширении инклюзивных форм работы.

Визуализация результатов тематического моделирования с использованием библиотеки ruLDAPvis (рисунок 1) позволила более детально интерпретировать структуру полученных тем и их взаимосвязи. На карте межтематических расстояний (Intertopic Distance Map) каждая тема представлена в виде круга, площадь которого пропорциональна доле соответствующей темы в корпусе текстов.

статистическим шумом, а, напротив, чётко указывает на основную целевую группу, для которой выстраиваются все описанные социальные, реабилитационные и образовательные практики. Это позволяет классифицировать весь корпус текстов, как дискурс «социально-педагогической и реабилитационной поддержки детей, в особенности с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ)».

Таблица 3. Выделенные темы и соответствующие ключевые слова

№	Ключевые слова	Интерпретация для темы
1.	зрение, инвалид, занятие, мероприятие, ребенок	Социальная и реабилитационная поддержка лиц с нарушениями зрения
2.	ребёнок, тема, работа, театр, овз	Инклюзивная культурно-досуговая деятельность для детей с ОВЗ
3.	ребёнок, занятие, провести, навык, работа	Формирование компетенций у детей через организованную деятельность
4.	марий, эл, козьмодемьянский, помощь, республика	Региональный аспект социальной поддержки
5.	ребёнок, парусной, менее, инклюзивный, спорт	Инклюзивные практики в детском спорте

Таким образом, тематическое моделирование позволило структурировать содержательное пространство грантовых проектов и выделить доминирующие направления, что даёт основание говорить о приоритетах в региональной поддержке в социальной сфере.

Для повышения надёжности результатов тематического моделирования текстов описаний социальных проектов были применены два метода – BERTopic и LDA. Оба алгоритма позволили выявить релевантные тематические кластеры, однако в силу различий в подходах к построению тем наблюдаются как совпадения, так и расхождения.

Анализ текстового корпуса с помощью LDA и BERTopic выявил как общие, так и специфические тематические кластеры. Оба метода фиксируют центральные направления деятельности: развитие и обучение детей, инклюзивные практики для детей с ОВЗ, социальную поддержку семей и людей с инвалидностью. Повторяются ключевые слова, отражающие эти темы: «ребёнок», «занятие», «мероприятие», «инвалид/ОВЗ», «развитие», «поддержка».

При этом LDA выделяет более широкие, обобщённые направления, например, «Образовательные мероприятия» или «Социальная поддержка семей», концентрируясь на функциональных аспектах деятельности. BERTopic, напротив, позволяет выделять более узкие и контекстно насыщенные кластеры: культурно-досуговая деятельность, спортивные практики, конкретные виды инвалидности или региональные инициативы.

Таким образом, LDA показывает стратегическую «карту» тем корпуса, а BERTopic добавляет детализацию, позволяя увидеть конкретные формы реализации программ. Совместное использование обеих моделей обеспечивает многослойное понимание содержания текстов и полезно для аналитики и планирования социальных и образовательных инициатив.

Распределение тематик грантов по официальным направлениям Фонда президентских грантов подтверждает выявленную в результате тематического моделирования доминанту проектов, связанных с поддержкой детства, семьи, социальной защиты и здоровья (таблица 4). Согласно данным корпуса (34 проекта за 2023–2025 гг.), наибольший удельный вес приходился на социальную поддержку населения (38,2%), охрану здоровья и пропаганду здорового образа жизни (20,6%), а также поддержку семей и детей (11,8%). Эти значения

эмпирически согласуются с тематическими кластерами, выделенными моделью BERTopic/LDA, что является свидетельством адекватности цифрового портрета региона.

Таблица 4. Распределения проектов по тематикам грантов

Тематика	Кол-во проектов	Доля (%)
Социальное обслуживание, социальная поддержка и защита граждан	13	38,2%
Охрана здоровья, пропаганда ЗОЖ	7	20,6%
Поддержка семьи, материнства, отцовства и детства	4	11,8%
Поддержка молодежных инициатив	2	5,9%
Охрана окружающей среды и защита животных	2	5,9%
Защита прав и свобод граждан	2	5,9%
Наука, образование, просвещение	2	5,9%
Сохранение исторической памяти	2	5,9%

Финансовое распределение также подтверждает выявленные тематические доминанты (таблица 5). Наибольший средний объем финансирования характерен для проектов в сфере образования и просвещения и сохранения исторической памяти, тогда как наибольший суммарный объем поддержки наблюдается в области социальной защиты населения. Это согласуется с тематическими акцентами, полученными при помощи LDA и BERTopic, что служит дополнительным подтверждением валидности сформированного цифрового портрета региона.

Таблица 5. Объем финансирования грантов по направлениям

Тематика	Кол-во проектов	Средний размер гранта (руб.)	Общий объем финансирования (руб.)
Поддержка проектов в области науки, образования и просвещения	2	4 511 424	9 022 848
Сохранение исторической памяти	2	3 131 201	6 262 402
Поддержка семьи, материнства, отцовства и детства	4	2 426 548	9 706 191
Социальное обслуживание, социальная поддержка и защита граждан	13	2 161 744	28 102 678
Поддержка молодежных проектов	2	1 479 025	2 958 050
Охрана здоровья и пропаганда ЗОЖ	7	1 895 493	13 268 453
Защита прав и свобод граждан	2	999 845	1 999 690
Охрана окружающей среды и защита животных	2	718 688	1 437 376

В свою очередь, относительно более низкий средний объем грантов в сферах экологии, правозащитной деятельности и молодежных инициатив отражает сравнительно меньший масштаб заявляемых программ. Таким образом, структурные и финансовые параметры грантовой поддержки демонстрируют высокую согласованность с тематическими результатами моделирования, что подтверждает достоверность и практическую значимость сформированного цифрового портрета региона.

Обсуждение. Выявленная тематическая структура (таблицы 2 и 3) однозначно указывает на то, что доминирующим фокусом гражданских инициатив и, как следствие, государственной поддержки в Республике Марий Эл является сфера детства. Полученный цифровой портрет рисует регион, активно инвестирующий в развитие человеческого капитала через поддержку образования, социальной защиты и инклюзии. Такая структура грантовой повестки в целом соответствует общероссийским стратегическим приоритетам в области демографии, семьи и детства. Полученные результаты согласуются с социально-демографическим профилем Республики Марий Эл, для которой характерна значительная доля детей и семей с детьми (по данным Маристат доля детей в общей численности населения региона составила 21,3% на начало 2025 года). Доминирование тем, связанных с развитием детей, образованием и инклюзией, соответствовало целям национальных проектов до 2024 года «Демография» и «Образование», а на 2025 год – национальным проектам «Семья» и «Молодежь и дети», а также направлениям, закреплённым в Стратегии социально-экономического развития Республики Марий Эл до 2030 года [15]. Согласованность результатов двух независимых методов тематического моделирования (LDA и BERTopic) подтверждает устойчивость и достоверность выявленных тематических кластеров.

Синтез LDA и BERTopic оказался не просто техническим приемом, а методологически обоснованным решением. LDA, как ожидалось, предоставил устойчивую и хорошо интерпретируемую «карту» крупных тематических направлений («Социальная поддержка семей», «Образовательные мероприятия»), что ценно для стратегического управления и выявления макроприоритетов. В свою очередь, BERTopic позволил погрузиться вглубь этих направлений, выявив специфические ниши и практики: например, реабилитацию людей с нарушениями зрения, инклюзивный театр или парусный спорт для детей с ОВЗ. Это позволяет органам власти не только видеть общие тренды, но и идентифицировать конкретные, точечные инициативы, заслуживающие тиражирования или дополнительной поддержки.

Предложенная методика позволяет в режиме, близком к реальному времени, отслеживать смещение акцентов в гражданской активности и оценивать соответствие распределения грантовых средств заявленным стратегическим целям региона. Выявленный дисбаланс в пользу поддержки детей (при возможном недостатке проектов для молодежи, старшего поколения или развития инфраструктуры) может стать основанием для корректировки конкурсной документации региональных грантов и информационной работы с НКО (некоммерческими организациями).

Полученный в ходе исследования «цифровой портрет» грантовой повестки позволяет не только зафиксировать актуальные направления, но и выявить ключевые дисбалансы, требующие стратегического внимания. В частности, наше предположение о недостаточном фокусе грантовых проектов на молодежной повестке находит полное подтверждение в положениях проекта Стратегии социально-экономического развития Марий Эл до 2036 года [16]. В данном документе молодежная политика названа одним из трех ключевых социальных приоритетов. Стратегия прямо признает наличие ключевых вызовов, таких, как миграционный отток молодежи в возрасте 25-34 лет, высокий уровень молодежной безработицы и нехватка досуговых молодежных пространств. Таким образом, доминирование в тематическом моделировании LDA и BERTopic тем, связанных с «детьми» и «социальной поддержкой семей», при минимальном отражении проблем «молодежи», объективно отражает сложившийся дисбаланс, который на уровне стратегического планирования был признан критически важным.

Кроме того, выявленный узкий тематический спектр проектов, преимущественно сосредоточенных в социальной сфере, может быть объяснен не только приоритетами финансирования, но и структурными ограничениями некоммерческого сектора региона.

Проекта Стратегии социально-экономического развития Марий Эл до 2036 года указывает на слабость развития третьего сектора в республике Марий Эл, отмечая низкое место региона в общероссийских рейтингах по развитию НКО. НКО региона, согласно данным Стратегии, отмечают недостаток постоянного финансирования и поддержки со стороны региональных властей. Это позволяет предположить, что полученный нами «цифровой портрет» фиксирует узкую нишу, где некоммерческий сектор смог наработать экспертизу для привлечения финансирования (преимущественно через федеральные гранты), но не отражает всего спектра социальных и экономических задач региона.

Перспективным направлением методики является возможность для ее дальнейшего масштабирования за счет расширения корпуса данных, включив в него сведения о федеральных и региональных грантах, а также их сопоставление с ключевыми направлениями государственных программ и медиа-повестки для достижения максимальной полноты анализа.

Заключение. В представленной работе была успешно апробирована методика построения цифрового портрета социально-экономического развития региона на основе автоматизированного текстового анализа описаний грантовых проектов. В качестве ключевого инструментария использовалась комбинация двух методов тематического моделирования – классического LDA и современного нейросетевого BERTopic.

Было установлено, что тематическое пространство грантовой поддержки в регионе концентрируется вокруг нескольких доминирующих направлений: развитие и образование детей, социальная поддержка семей, инклюзия и адаптация людей с инвалидностью, а также организация культурно-досуговых и спортивных мероприятий. Смыслообразующим ядром всей грантовой повестки является целевая группа «дети», что указывает на стратегический приоритет инвестиций в человеческий капитал.

Сопоставление результатов тематического моделирования с проектом Стратегии социально-экономического развития Марий Эл до 2036 года демонстрирует четкую синергию: выявленные грантовые приоритеты (такие, как поддержка детей с ОВЗ, реабилитация лиц с нарушениями зрения, инклюзивное образование) полностью совпадают с действующими и планируемыми стратегическими задачами региональной политики. Это доказывает, что метод позволяет точно фиксировать направления, где гражданские инициативы и государственные приоритеты уже находятся в гармонии.

Однако наибольшая ценность метода заключается в его диагностическом потенциале для выявления стратегических пробелов и зон роста. «Цифровой портрет», который нами был зафиксирован, показывает подавляющее доминирование социальной сферы в грантовой активности. Между тем, проект Стратегии социально-экономического развития Марий Эл до 2036 года задает более широкий экономический и культурный вектор развития, фокусируясь на таких приоритетах, как «Регион передовых технологий» и «Регион культуры и гостеприимства». Стратегия указывает на необходимость развития креативных индустрий и туристической инфраструктуры. Наш анализ показывает, что некоммерческий сектор в настоящее время не вовлечен в реализацию этих новых экономических и культурных приоритетов. Таким образом, предложенный в статье инструмент может быть использован управленческими командами для директивной корректировки региональной грантовой политики, целенаправленно стимулируя появление и финансирование заявок НКО в стратегически важных, но пока слабо представленных в гражданских инициативах направлениях.

Практическая значимость работы заключается в демонстрации того, что методы машинного обучения, в частности, тематическое моделирование, превращают массив неструктурированных текстовых данных в мощный аналитический ресурс для органов

управления. Предложенный подход позволяет автоматизировать мониторинг и диагностику состояния социальной сферы, визуализировать латентные тематические паттерны для их наглядной интерпретации, обеспечивать обоснование управленческих решений на основе методологии Data-Driven.

Предложенный цифровой портрет может использоваться, как аналитический инструмент для мониторинга грантовых приоритетов региона, оценки сбалансированности поддержки различных социальных групп, а также выявления недофинансированных направлений. На основе полученных результатов могут формироваться рекомендации по корректировке грантовой политики и программ поддержки в рамках региональных конкурсов для социально ориентированных некоммерческих организаций. Органы власти могут целенаправленно стимулировать подачу заявок в недостаточно представленные сферы. Выявление нишевых инициатив – для управленца это не просто тема, а конкретная практика, которую можно проанализировать на предмет эффективности и тиражировать в других муниципалитетах. Разработанная модель обладает выраженным прикладным потенциалом для органов регионального управления и инфраструктуры поддержки НКО.

Таким образом, исследование подтверждает, что цифровой портрет региона, построенный на основе анализа грантовых проектов, является релевантным и эффективным инструментом для анализа приоритетов развития, обеспечивающим новые возможности для повышения эффективности регионального и муниципального управления. Применяемые авторами методы LDA и BERTopic дают возможность перейти от измерения «цифровой зрелости» через стандартизированные индикаторы к интерпретации латентных тематических профилей, формирующих цифровую повестку региона в его стратегических документах и проектных инициативах.

Список источников

1. Annals of computer science and information systems: proceedings of the 19th Conference on Computer Science and Intelligence Systems (FedCSIS), Belgrade, Serbia, September 8-11, 2024, vol. 39. DOI:10.15439/978-83-969601-6-0.
2. Schiavon L. Addressing topic modelling via reduced latent space clustering. *Statistical Methods & Applications*, 2025, vol. 34, pp. 1–20
3. Ma L., Chen R., Ge W. et al. AI-powered topic modeling: comparing LDA and BERTopic in analyzing opioid-related cardiovascular risks in women. *Experimental Biology and Medicine*, 2025, vol. 250, p. 10389. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40093658/> (accessed: 08/20/2025).
4. Ващенко В.А. Тематическое моделирование для коротких текстов: сравнительный анализ алгоритмов / В.А. Ващенко // *Социология*: 4М, 2023. – № 56. – С. 69-99.
5. Rejeb A., Rejeb K., Appolloni A. et al. Navigating the landscape of public–private partnership research: a novel review using latent Dirichlet allocation. *International Journal of Public Sector Management*, 2025, vol. 38, no. 2, pp. 213–237.
6. Wu X., Han Y., Yang F. et al. Analyzing CASIS policy data with AI: sentiment trends and topic modeling. *Research Square* [preprint], 2024, DOI:10.21203/rs.3.rs-5271894/v1.
7. Saheb T., Dehghani M. Artificial intelligence for sustainable energy: a contextual topic modeling and content analysis. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2022, vol. 35, article ID 100699, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210537922000584> (accessed: 08/20/2025)
8. Мухачёва А.В. Цифровой профиль региона как фактор развития цифрового потенциала в социальной сфере / А.В. Мухачёва // *Экономика, предпринимательство и право*, 2025. – Т. 15, № 2. – С. 1219-1240.
9. Былинская, А.А. Цифровой портрет российских регионов: методологические основания исследования / А.А. Былинская // *Социальные процессы современной России: материалы Международной научно-практической конференции (г. Нижний Новгород, 19–20 ноября 2020 г.)*. – Нижний Новгород : ООО «Научно-исследовательский социологический центр», 2020. – Т. 2. – С. 53-57.
10. Бушуева М.А. Метод обоснования факторного портрета регионов / М.А. Бушуева, Н.Н. Масюк, З.В. Брагина и др // *АНИ: экономика и управление*, 2022. – № 4 (41). – С. 14-17.

11. Гусарова О.М. Цифровые модели социально-экономического развития региональных субъектов / О.М. Гусарова, В.Д. Кузьменкова, П.И. Комаров // Фундаментальные исследования, 2018. – № 8. – С. 42-47.
12. Романчуков С.В. Информационная система для анализа и моделирования социального и экономического развития региона / С.В. Романчуков, И.А. Лызин, О.В. Марухина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. – № 3 (19). – С. 96-104.
13. Бождай А. С. Методика численной оценки уровня цифровой трансформации приоритетных направлений социально-экономических процессов регионов / А.С. Бождай, В.В. Свиридова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе, 2023. – № 2. – С. 172-184.
14. Строев В. В. Анализ цифровой зрелости регионов Российской Федерации / В.В. Строев, С.В. Сидоренко // Вестник университета, 2024. – № 5. – С. 5-14.
15. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Республики Марий Эл на период до 2030 года: утверждена постановлением Правительства Республики Марий Эл от 17 января 2018 г. № 12. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/446647066>(дата обращения: 20.08.2025)
16. Проект Стратегии социально-экономического развития Республики Марий Эл на период до 2036 года. – URL: <https://mari-el.gov.ru/upload/medialibrary/ac1/2j9wij7rqujht6dgqymgnjqcr3z07bj.pdf>(дата обращения: 20.08.2025)

Митрофанова Татьяна Валерьевна. Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. AuthorID: 630193, SPIN: 2567-1670, ORCID: 0000-0002-5750-7991, mitrofanova_tv@mail.ru. 428015, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Московский пр-т, д. 15.

Христофорова Анастасия Владимировна. Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. AuthorID: 591162, SPIN: 4797-3333, ORCID: 0000-0003-3534-8747, dlya.nastenki@mail.ru. 428015, Чувашская Республика, г. Чебоксары, Московский пр-т, д. 15.

UDC 004.8:303.72

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.010

Digital profile of regional development: analysis of grant projects using LDA and BERTopic

Tatiana V. Mitrofanova, Anastasia V. Khristoforova

Chuvash State University named after I.N. Ulyanov,
Russia, Cheboksary, mitrofanova_tv@mail.ru

Abstract. This article proposes an approach for creating a digital profile of a region's socio-economic development through automated text data analysis. Grant project descriptions from the Republic of Mari El (2023–2025) were used as a key indicator. By combining classical LDA with the modern neural BERTopic model, latent thematic patterns shaping the region's current development agenda were identified and visualized. The resulting digital profile allows for an objective evaluation of civic initiatives, highlights dominant areas such as social support, human capital development, sports, and education, and assesses their alignment with regional strategic goals.

The study found that the target group "children" forms the core of the grant agenda, centering on clusters of educational, rehabilitation, and inclusive projects. LDA modeling identified five consistent thematic areas, including support for families with children and the adaptation of individuals with disabilities. BERTopic, in turn, enabled the detailed elaboration of narrow niche practices, such as inclusive sports, rehabilitation for people with visual impairments, and cultural and leisure programs for children with disabilities, confirming the high semantic sensitivity of the neural network approach. Comparison of the resulting thematic clusters with the draft Strategy for Socioeconomic Development of the Republic of Mari El revealed both areas of complete priority overlap (childhood support, inclusion) and strategic imbalances: the underrepresentation of projects in the creative industries, tourism, and youth work. The proposed methodology demonstrates that machine learning methods open up new opportunities for monitoring and diagnosing the state of regional and municipal systems, providing

management teams with a data-driven tool for decision-making and adjusting grant policy. Thus, thematic modeling enables the translation of unstructured text data into an objective analysis, transforming descriptions of civic initiatives into a reliable tool for identifying real social priorities and the basis for strategic planning.

Keywords: digital regional profile, topic modeling, LDA, BERTopic, data-driven management, grant analysis, regional development, machine learning, natural language processing (NLP), Republic of Mari El

References

1. Annals of computer science and information systems: proceedings of the 19th Conference on Computer Science and Intelligence Systems (FedCSIS), Belgrade, Serbia, September 8-11, 2024, vol. 39. DOI:10.15439/978-83-969601-6-0.
2. Schiavon L. Addressing topic modelling via reduced latent space clustering. *Statistical Methods & Applications*, 2025, vol. 34, pp. 1–20
3. Ma L., Chen R., Ge W. et al. AI-powered topic modeling: comparing LDA and BERTopic in analyzing opioid-related cardiovascular risks in women. *Experimental Biology and Medicine*, 2025, vol. 250, p. 10389. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40093658/> (accessed: 08/20/2025).
4. Vashchenko V.A. Tematicheskoye modelirovaniye dlya korotkikh tekstov: sravnitel'nyy analiz algoritmov [Topic modeling for short texts: a comparative analysis of algorithms]. *Sotsiologiya: 4M [Sociology: Methodology, Methods, Mathematical Modeling]*, 2023, no. 56, pp. 69-99.
5. Rejeb A., Rejeb K., Appolloni A. et al. Navigating the landscape of public–private partnership research: a novel review using latent Dirichlet allocation. *International Journal of Public Sector Management*, 2025, vol. 38, no. 2, pp. 213–237.
6. Wu X., Han Y., Yang F. et al. Analyzing CASIS policy data with AI: sentiment trends and topic modeling. *Research Square [preprint]*, 2024, DOI:10.21203/rs.3.rs-5271894/v1.
7. Saheb T., Dehghani M. Artificial intelligence for sustainable energy: a contextual topic modeling and content analysis. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2022, vol. 35, article ID 100699, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210537922000584> (accessed: 08/20/2025)
8. Mukhacheva A.V. Tsifrovoy profil' regiona kak faktor razvitiya tsifrovogo potentsiala v sotsial'noy sfere [Digital profile of the region as a factor in the development of digital potential in the social sphere]. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo [Journal of economics, entrepreneurship and law]*, 2025, vol. 15, no. 2, pp. 1219-1240.
9. Bylinskaya A.A. Tsifrovoy portret rossiyskikh regionov: metodologicheskiye osnovaniya issledovaniya [Digital portrait of Russian regions: methodological foundations of the study]. *Sotsial'nyye protsessy sovremennoy Rossii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Social processes of modern Russia: proceedings of the International scientific and practical conference]*. Nizhny Novgorod, NISC Publ., 2020, vol. 2, pp. 53-57.
10. Bushueva M.A., Masyuk N.N., Bragina Z.V. et al. Metod obosnovaniya faktornogo portreta regionov [Method of substantiating the factor portrait of regions]. *ANI: ekonomika i upravlenie [ANI: economics and management]*, 2022, no. 4 (41), pp. 14-17.
11. Gusarova O.M., Kuzmenkova V.D., Komarov P.I. Tsifrovyye modeli sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya regional'nykh sub'yektov [Digital models of socio-economic development of regional subjects]. *Fundamental'nyye issledovaniya [Fundamental research]*, 2018, no. 8, pp. 42-47.
12. Romanchukov S.V., Lyzin I.A., Marukhina O.V. Informatsionnaya sistema dlya analiza i modelirovaniya sotsial'nogo i ekonomicheskogo razvitiya regiona [Information system for analysis and modeling of social and economic development of the region]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management]*, 2020, no. 3 (19), pp. 96-104.
13. Bozhday A.S., Sviridova V.V. Metodika chislennoy otsenki urovnya tsifrovoy transformatsii prioritnykh napravleniy sotsial'no-ekonomicheskikh protsessov regionov [Methodology for numerical assessment of the digital transformation level of priority areas of socio-economic processes in regions]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society]*, 2023, no. 2, pp. 172-184.
14. Stroev V.V., Sidorenko S.V. Analiz tsifrovoy zrelosti regionov Rossiyskoy Federatsii [Analysis of digital maturity of the regions of the Russian Federation]. *Vestnik universiteta [University bulletin]*, 2024, no. 5, pp. 5-14.
15. Ob utverzhdenii Strategii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Mariy El na period do 2030 goda [On approval of the strategy for socio-economic development of the Republic of Mari El for the period up to 2030]. Approved by Decree of the Government of the Republic of Mari El No. 12 of January 17, 2018. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/446647066> (accessed: 08.20.2025).
16. Proyekt Strategii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Mariy El na period do 2036 goda [Draft Strategy for Socio-Economic Development of the Republic of Mari El for the period up to 2036]. Available at: <https://mari-el.gov.ru/upload/medialibrary/ac1/2j9wjj7rqpjht6dgqymgnjqcr3z07bj.pdf> (accessed: 08.20.2025).

Mitrofanova Tatiana Valeryevna. *Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor Department of Mathematical and Hardware Support of Information Systems, Chuvash State University named after I.N. Ulyanov. AuthorID: 630193, SPIN: 2567-1670, ORCID: 0000-0002-5750-7991, mitrofanova_tv@mail.ru. 428015, Russia, Chuvash Republic, Cheboksary, Moskovsky Prospect, 15.*

Khristoforova Anastasia Vladimirovna. *Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor Department of Mathematical and Hardware Support of Information Systems, Chuvash State University named after I.N. Ulyanov. AuthorID: 591162, SPIN: 4797-3333, ORCID: 0000-0003-3534-8747, dlya.nastenki@mail.ru. 428015, Russia, Chuvash Republic, Cheboksary, Moskovsky Prospect, 15.*

Статья поступила в редакцию 08.10.2025; одобрена после рецензирования 05.11.2025; принята к публикации 06.02.2026.

The article was submitted 10/08/2025; approved after reviewing 11/05/2025; accepted for publication 02/06/2026.

Алгоритм формирования стратегии управления рисками в строительных проектах

Сидоренко Никита Александрович, Яркова Ольга Николаевна

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Санкт-Петербург, *nikitasidorenko1998@gmail.com*

Аннотация. Статья посвящена разработке математического инструментария, позволяющего обосновать выбор стратегических решений по управлению рисками при реализации плана строительства объекта в установленные сроки. Процесс управления рисками в строительной сфере требует от строительных компаний адаптации к современным реалиям и внедрения современных систем риск-менеджмента для успешной реализации строительных проектов. Одним из важнейших показателей эффективности реализации проекта является соответствие срока реализации проекта строительству плановым значениям. Важно правильно оценить сроки строительства с учетом рисков, влияющих на реализацию проекта. Цель работы заключается в разработке инструментария, позволяющего моделировать продолжительность реализации проекта строительства в условиях рисков. В работе проведен анализ существующих подходов к управлению рисками в строительных проектах; предложена методика формирования стратегии управления рисками, апробированная на примере строительства типового жилого железобетонного здания. Для рассматриваемого проекта выявлены ключевые риски, влияющие на продолжительность строительства. Показан пример формирования матрицы управляемых параметров. Описан способ построения матрицы игры на основе сетевого графика плана строительства для заданных стратегий игрока и природы: проведено моделирование продолжительности работ по методу Монте-Карло – получено вероятностное распределение времени выполнения работ проекта; показана возможность снижения вычислительной сложности алгоритма за счет аппроксимации ряда значений матрицы игры по методу наименьших квадратов; матрица игры построена, для примера, на основе характеристики вероятностного распределения «срок строительства с заданной вероятностью (надежностью)», определена стратегия принятия решений по принципу Лапласа. Применение разработанного инструментария для оценки рисков невыполнения проекта в установленные сроки позволит эффективно управлять рисками в строительных проектах. Предложенный подход может иметь высокую практическую значимость при реализации строительных проектов и возможность интеграции в систему управления рисками на различных этапах жизненного цикла строительных проектов.

Ключевые слова: управление рисками, статистическое моделирование, теория игр, риск-ориентированный подход, строительные проекты

Цитирование: Сидоренко Н.А. Алгоритм формирования стратегии управления рисками в строительных проектах/ Н.А. Сидоренко, О.Н. Яркова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 150-163 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.011.

Введение. В настоящее время, ввиду глобализации, внутренняя и внешняя среда способствуют появлению спектра различных рисков, влияющих на жизненный цикл строительного проекта. Разнообразие и масштаб этих рисков требуют их детального анализа. Согласно данным Федеральной Службы государственной статистики (по состоянию на 2-й квартал 2024 г.), одними из наиболее существенных факторов, ограничивающих производственную деятельность строительных предприятий стали: высокая стоимость материалов, конструкций и изделий, высокий уровень налогов и недостаток квалифицированных кадров [1]. Для снижения рисков в сфере реализации строительных проектов необходимо внедрение системного риск-ориентированного подхода [2, 3], предусматривающего качественный и количественный анализ рисков, разработку стратегий управления рисками, принятие соответствующих управленческих решений. Таким образом, процесс управления рисками в строительной сфере требует от строительных компаний адаптации к современным реалиям и внедрения современных систем риск-менеджмента для успешной реализации строительных проектов.

Авторы работ [2, 4] отмечают, что для успешного управления рисками строительных проектов необходимо применять новые подходы, например, использовать методы теории игр и имитационного моделирования, позволяющие разрабатывать оптимальные стратегии для управления рисковыми ситуациями. Использование теории игр позволяет моделировать различные сценарии взаимодействия лица, принимающего решения (ЛПР), с внешними факторами, а также позволяет детально анализировать риск, оценивать влияние рисков на строительный проект и обосновывать выбор стратегий минимизации угроз. В сочетании с имитационным моделированием этот подход позволяет создавать адаптивные модели для выбора стратегий управления, с учетом различных сценариев реализации рисков. Разработка таких методов требует анализа существующих актуальных исследований и разработок в анализируемой области.

В статье Тогузова И.З., Антонова Е.И., Гульчеева Д.А [5] рассматривается комплексный подход по управлению рисками, связанными с финансовой деятельностью компании. В работе авторы отмечают, что компаниям необходимо не только выявлять рисковые события, но и предугадывать скрытые в них возможности, переходить от децентрализованного к централизованному, интегрированному риск-менеджменту с формированием профильного органа по управлению рисками в компаниях.

В работе Забелина А.А. [6] рассматривается управление инвестиционными рисками методом хеджирования путем открытия встречного финансового потока при помощи фьючерсов. В статье Я.А. Вавилина [7] рассматривается применение теории игр для обоснования выбора методов риск-ориентированного подхода. В статье Д.Г. Петриченко, Г.С. Петриченко [8] применяют теорию игр для выбора наиболее выгодной рекламной стратегии при выведении на рынок нового объекта недвижимости. Ахвердиева С.Г и др. [9] описывают основные экономические риски и их влияние на эффективность нефтегазовых проектов. В.А. Панюшкин [10] применяет теорию игр для многокритериального анализа строительства автомобильных дорог. А.В. Капусто, С.Н. Костюкова [11] в своей работе рассматривают планирование финансовой деятельности строительной компании, при принятии решения по участию в торгах, и планировании ее деятельности в условиях неопределённости методами теории игр. В своей работе Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцев И.С., Зайцева И.А [12] отмечают, что использование имитационного моделирования позволяет оценить эффективность строительства, а также проанализировать неблагоприятные ситуации, которые могут возникнуть на разных этапах строительства. Тараненко С.Н. В говорит о том, что использование математического моделирования повышает эффективность и надежность оценки рисков [13]. Ковалева Е.А. в своей работе использует имитационное моделирование для планирования сельско-хозяйственного производства с учётом климатических рисков [14]. Отметим широкое применение теории игр и имитационного моделирования в различных отраслях, при этом недостаточно внимания в научных публикациях уделяется моделированию рисков в строительной сфере, обладающей рядом специфических черт: сложные комплексы работ, продолжительные сроки реализации проектов, отсроченная доходность вложений и т.п.

Таким образом, для анализа и выработки стратегий управления рисками строительных проектов необходимо применять риск-ориентированный подход с использованием методов теории игр и имитационного (статистического) моделирования, а также современные программные инструменты.

1. Цель и задачи исследования. Цель работы заключается в разработке математических инструментов, которые позволяют эффективно моделировать продолжительность строительства объектов в условиях рисков. Задачи исследования: выявить ключевые риски, влияющие на строительные проекты; разработать модель, описывающую план реализации

строительства объекта с учетом рискованных ситуаций; разработать алгоритм формирования стратегий принятия решений; провести апробацию алгоритма на примере выявленных видов риска.

2. Модели и методы исследования. В качестве основных методов были использованы: PERT, методы имитационного моделирования Монте-Карло, теории игр, экспертных оценок, вероятностно-статистические методы, методы аппроксимации.

Алгоритм формирования стратегии управления рисками:

1. Построить модель жизненного цикла проекта строительства (или конкретного этапа, например, строительства объекта) в виде сетевого графика. Исследовать свойства, критический путь.

2. Выявить рискованные события. Пусть выявлено N видов рисков. Выполнить оценку влияния рискованных событий на выполняемые работы. Разработать локальные стратегии управления K_i по каждому виду риска $i = 1, N$. Выполнить анализ рискованных ситуаций по каждому виду риска i – т.е. его реализацию в проекте в зависимости от состояний среды. Пусть R_i – рассматриваемые состояния среды по виду риска i . Провести анализ влияния i -го вида риска на продолжительность строительства.

Для параметров (K_l, R_m) $l=1,2..k_i$; $m=1,2..r_i$ (здесь k_i – количество стратегий ЛПР по i -му виду риска, r_i – количество состояний природы по i -му виду риска) построить таблицу оценок: продолжительности увеличения срока работ $X^{(l,m)}$ при реализации риска и вероятностей реализации соответствующего вида риска $q^{(l,m)}$.

3. Составить матрицу игры на основе стратегий игроков. У ЛПР $\prod_{i=k}^N k_i$ стратегий, каждая стратегия включает все комбинации управления по каждому виду риска. У природы $\prod_{i=k}^N r_i$ стратегий, где каждая стратегия природы – все комбинации состояний природы по каждому виду риска. Элементами платежной матрицы (и соответственно целевыми критериями) могут выступать вероятностные характеристики закона распределения времени выполнения проекта, оцененные по методу Монте-Карло на основе сетевого графика с учетом реализуемых стратегий ЛПР и природы, например: ожидаемый срок строительства, вероятность закончить проект в заданный срок, время выполнения проекта с заданной надежностью, и т.п.

Выбрать ключевые элементы платежных матриц для проведения расчётов. Расчет ключевых элементов платежных матриц (по выбранным критериям) осуществляется по методу Монте-Карло на основе сетевого графика работ с учетом возможных комбинаций рисков, вероятностей их наступления и последствий их реализации.

Аппроксимировать остальные элементы платежной матрицы по ключевым рассчитанным значениям с использованием метода наименьших квадратов.

4. Определить оптимальную стратегию по выбранному целевому критерию и критерию принятия решений, например, Лапласа, Гурвица и др.

3. Апробация и результаты. За основу исследования был взят календарный график строительства типового жилого железобетонного здания. Длина критического пути составила 679 дней.

Сформируем стратегии лица, принимающего решения, как основу для дальнейшей работы с назначением метода управления [15] и соответствующих мероприятий, снижающих рискованную ситуацию.

Рассмотрим возможные способы управления рисками: $C1$ – «снижение риска», предусматривает снижение вероятности и/или степени влияния риска – например, снижение вероятности возникновения риска на 20%-30% и/или степени негативного влияния на 20%-30% (может варьироваться в зависимости от вида риска и возможности снизить его); $C2$ – «существенное снижение риска», предусматривает существенное снижение вероятности

и/или степени влияния риска – например, снижение вероятности на 60%-80% и/или степени влияния на 60%-80% (может так же варьироваться в зависимости от вида риска). Стратегия «принятие риска» в настоящей работе не рассматривается ввиду того, что она является доминируемой по отношению к рассматриваемым критериям эффективности стратегии управления рисков, в частности, по показателям продолжительности проекта.

Методику формирования стратегии принятия решений продемонстрируем на примере десяти выявленных видов рисков, приведенных в таблице 1 и обозначенных N1, N2, ...N10.

Таблица 1. Виды риска, стратегии управления рисками

Вид риска	Информационная сводка	Мероприятия по снижению риска
Сверх инфляция (N1)	Отраслевая инфляция в 2023г составила 6,9-7,1%. Отраслевая инфляция в 2022-м (более 13%). Потребительская инфляция за 2023г. составила 7,4% [16]. Основные последствия инфляции для строительной компании [17]: 1. Снижение себестоимости выпускаемой продукции. 2. Занижение стоимости имущества организации и расходов. 3. Искажение финансовых коэффициентов. 4. Усложнения принятия управленческого решения.	Методы управления C1, мероприятия: – избегать больших объемов дебиторской задолженности; – увеличить кредитные займы под выгодный процент (как правило до повышения ключевой ставки) для оплаты займа обесценившимися деньгами; – заблаговременно закупить товары и материалы; – сформировать резерв материалов по до инфляционным ценам; – своевременно повышать цены на продукт выпускаемой компанией.
		Методы управления C2, мероприятия: – выполнять переоценку активов; – применять методы по начислению амортизации по основным активам.
Нехватка ИТР и специалистов узкого профиля (N2)	7 мая 2024г. вышел указ «Указ о национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036» согласно которому необходимо обеспечить граждан жильем общей площадью не менее 33 кв. метров на человека к 2030 году и не менее 38 кв. метров к 2036 году [18]. По данным Минстроя России, в среднем каждый год профильные высшие и средние специальные учебные заведения страны выпускают около 30 тыс. специалистов, средние заведения - порядка 45 тыс. Но чтобы добиться намеченного ежегодного ввода «квадратов» нового жилья, эту численность выпускников, согласно подсчетам министерства, надо удвоить [19]. Также стоит отметить, что почти половина выпускников вузов не идет работать по специальности после окончания учебных заведений, а опыт специалистов из стран СНГ оставляет желать лучшего.	Методы управления C1, мероприятия: – формирование HR отдела, для отбора кандидатов на должности, проведения собеседований; – разработка системы отбора путем выполнения тестового задания или заданий; – собеседование с непосредственным начальством; – организация периодических курсов повышения квалификации сотрудников.
		Методы управления C2, мероприятия: – разработка совместно с вузами целевых программ для студентов; – ведение практики наставничества в компании; – привлечение иностранных специалистов; – популяризация строительной сферы.

Продолжение таблицы 1.

Вид риска	Информационная сводка	Метод управления и мероприятия по снижению риска
Риски роста тарифов на грузовые перевозки (N3)	Нехватка сотрудников, удорожание сервисного обслуживания ввиду недостатка необходимых деталей, спекулятивный рост на тяжеловесные тягачи ввиду их дефицита на рынке, инфляция, высокая стоимость горюче-смазочных материалов, изменение логистических маршрутов (на данный момент более востребованными стали маршруты в Азию и ближний восток, что увеличивает расстояние грузоперевозок)	<p>Методы управления С1, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – бережное отношение к машинам; – своевременный уход за машинами; – продление ресурса эксплуатации узлов и агрегатов, которые не влияют на безопасность дорожного движения [20]. <p>Методы управления С2, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – популяризировать профессию водителя среди молодой части населения; – создавать достойные условия для работы сотрудников.
Неточность, ошибки в ПСД (N6)	<p>Согласно Главгосэкспертизе (ГГЭ) за 2021 год доля отрицательных заключений составила 12% (из 4211 заключений), из них наиболее частые замечания это: отсутствие необходимой исходно-разрешительной документации или несоответствие одних документов другим, в частности, проектных решений, исходно-разрешительной документации; низкая проработка предпроектной стадии, выражающаяся в допущенных ошибках в исходных данных; частичное отсутствие утвержденных в установленном порядке документов землепользования, градостроительных планов, проектов планировки и межевания территории; отсутствие обоснованных технических условий на подключение инженерных коммуникаций: довольно часто требуется актуализация технических условий ввиду истечения срока их действия; принятие проектных решений по недействующим на момент проектирования строительным нормам, стандартам и проектной документации (сериям и типовым проектам); технические ошибки в расчетах, несущих конструкции и проектных решениях, которые могут привести к аварийным ситуациям.</p> <p>Среди факторов, влияющих на качество проектной документации, ГГЭ выделяет: подготовка проектной документации осуществляется организациями с малым опытом проектирования, не специализирующимися в конкретной отрасли, не имеющими в своем штате квалифицированных специалистов; привлечение непрофильных проектных организаций для разработки документации объектов строительства, имеющих определенную специфику; изменение требований заказчика к проектируемому объекту в процессе проектирования и экспертизы, которые влекут большой объем переработки принятых проектных решений [23]. Ошибки в ПСД могут привести к увеличению бюджета, срокам проекта строительства, разрушению объекта и гибели людей.</p>	<p>Методы управления С1, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – ответственный подход к выбору компании предоставляющей услуги по разработке ПСД, учитывая ее опыт, отзывы и компетентность; – разработка корректного ТЗ для проектной компании и объективная оценка сроков выполнения работ по проектированию. <p>Методы управления С2, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – введение BIM; – ввод в штат проектировщиков и оценка качества проекта до заключения договора подряда.

Продолжение таблицы 1.

Вид риска	Информационная сводка	Метод управления и мероприятия по снижению риска
Отсутствие материалов на рынке или их высокая стоимость (N4)	Отсутствие материалов или их высокая цена может повлиять на стоимость и (или) график строительного проект, а также качество выполняемых работ, ввиду того, что застройщики будут вынуждены использовать аналоги материалов или менее качественные строительные материалы	<p>Методы управления C1, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – периодический контроль рынка материалов, поиск материалов аналогов для оперативной замены их во время производства работ; – формирование резерва материалов; – иметь нескольких поставщиков для основных строительных материалов.
		<p>Методы управления C2, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – покупка материалов через параллельный импорт; – подписание договоров с дилерами строительных материалов по продаже материалов по фиксированной цене.
Неграмотное управление проектом строительства (N5)	Основные причины неграмотного управления проектом строительства: несогласованность действий руководящего звена между собой и подчиненными; неверное принятие решения ввиду недостаточности информации и непонимания картины проекта строительства в целом; некомпетентность руководящего состава.	<p>Методы управления C1, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – привлечение стороннего независимого руководящего состава (Фи-девелопера) для управления проектом [21]; – формирование реестра ответственности (прописать задачи, назначить ответственных за их выполнение, прописать критерии достижения целей по задачам).
		<p>Методы управления C2, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – введение инструментария для управления проектами (например, софт на базе 1С «Бит.Строительство» [22]).
Нарушение техники безопасности, производственные травмы (N7)	<p>По данным Роструда и Федерации независимых профсоюзов России, в 2022 году произошло 5563 несчастных случая на производстве, в том числе 381 групповых случаев, 3913 – с тяжелым исходом, 1269 – с летальным исходом. За последние пять лет количество таких происшествий снизилось на 9%.</p> <p>За пять лет число пострадавших снизилось на 16%, за 10 лет – вдвое, за 20 лет – в 6,3 раза. Количество случаев со смертельным исходом уменьшилось с 4,4 тысячи человек в 2000 году до 1,07 тысячи в 2022. Однако в процентном соотношении летальные исходы регистрируют чаще: в 2022 году – 5,3% от общего количества пострадавших, в то время как в 2000 – 2,9% [24].</p>	<p>Методы управления C1, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – проведение планового, внепланового, первичного, вводного инструктажей по охране труда; – проведение обучения по ОТ, ТБ и ПБ; – ввод системы штрафов за нарушения ТБ; – формирование отдела по ОТ и ТБ с непосредственным контролем соблюдения ОТ и ТБ на строительной площадке; – использование комплекса методов по анализу и управлению рисками в сфере ОТ и ТБ [25]; – обеспечение сотрудников СИЗ и СКЗ. <p>Методы управления C2, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вывести охрану труда как корпоративную этику компании: создание нативной рекламы посредством устройства плакатов по ТБ, уголков по охране труда, звукового вещания напоминающего о важности соблюдения ТБ, лекций и тренингов среди сотрудников компании; – ввод системы поощрений за внесение вклада в улучшение ТБ, указание опасных факторов во время производства работ.

Продолжение таблицы 1.

Вид риска	Информационная сводка	Мероприятия по снижению риска
Хищение материалов и оборудования (N9)	Проблема хищения материалов и оборудования стоит остро в каждой компании, выполняющей строительные работы. Хищения выполняются как одним лицом, так и группой лиц независимо от статуса и положения преступника в компании. Хищение материалов и оборудования может оказать существенное влияние на стоимость строительного проекта, а также отразиться на качестве выполненных работ и продолжительности строительства.	<p>Методы управления С1, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – складирование материалов и оборудования после окончания ежедневной смены в специальных вагончиках/складах для хранения; – выдача инструментов под личную ответственность сотрудникам под подпись в журнале; – устройство КПП и пункта охраны строительного объекта; – установка круглосуточного фото и видео наблюдения; – заключение договора с вневедомственной охраной; – формирование реестра выдачи материалов со склада под подпись ответственного лица; – входной контроль строительных материалов, учёт строительных материалов; – регулярное проведение инвентаризации.
		<p>Методы управления С2, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – ужесточение прохода через КПП в части введения пропусков и досмотра сотрудников; – своевременная выплата заработной платы в полном объеме для исключения комбинаторских хищений со стороны сотрудников; – взвешивание машин, транспортирующих материалы на въезде и выезде с строительной площадки.
Нехватка рабочей силы (N10)	<p>Причиной может стать увеличение объемов строительства, отток рабочей силы из-за ужесточения эмиграционной политики государства, неконкурентоспособный уровень заработной платы ввиду ослабления местной валюты, отток рабочей силы на приоритетные строительные направления с большим финансированием (восстановление новых регионов, развитие оборонной промышленности), демографический дефицит, отток кадров за рубеж.</p> <p>В 2023 году из Таджикистана работать за границу выехали 652 014 человек, что на 16% меньше по сравнению с 2022 годом, когда на заработки выехали 775 578 человек. Из общего числа выезжающих за рубеж иммигрантов 627 028 человек выехали в Российскую Федерацию, 18 418 – в Казахстан и 6 568 – в другие государства [26].</p>	<p>Методы управления С1, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – по аналогии с IT-специальностями, как на государственном, так и на местном уровне вводить ряд преференций в пользу строительных специальностей; – выплата достойной конкурентно-способной заработной платы; – улучшение условий труда; – формирование реестра потенциальных сотрудников; – формирование HR-отдела, для оперативного поиска кандидатов на должности, формирования реестра потенциальных сотрудников, ведения SMM, проведения собеседований и тд.
		<p>Методы управления С2, мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> – привлечение молодых специалистов из ВУЗов, студенческих отрядов; – нематериальное поощрение, улучшение имиджа компании; – поиск кандидатов на удаленную или совмещенную работу при возможности работы в таком формате для данной специальности.

Окончание таблицы 1.

Вид риска	Информационная сводка	Мероприятия по снижению риска
Отказ оборудования: Поломки или неисправности оборудования (N8)	Ни одна стройка не обходится без поломки оборудования, машин или механизмов. В зависимости от поломки оборудования могут быть серьезно сдвинуты сроки строительства (например, поломка башенного крана) и увеличены затраты строительство	Методы управления C1, мероприятия: – проверка исправности механизмов и оборудования до, во время и после окончания работ; – проведение технического освидетельствования оборудования и механизмов, применение системы цветовой кодировки механизмов с указанием даты последней проверки, ведение журналов проверки оборудования и механизмов включая регистрацию поломок в промежутке между техническим освидетельствованием.
		Методы управления C2, мероприятия: – формирование культуры надежности, смысл которой заключается в том, что при обнаружении даже самой незначительной поломки, которая не является критичной в момент производства работ, но может стать критичной впоследствии, необходимо принять меры по ее устранению.

На основе приведенных методов управления риском сформируем стратегии управления рисками лица, принимающего решения A1-A1024, некоторые из них приведены в таблице 2. Рассмотрим возможные состояния внешней среды, формирующие стратегии природы: Н – низкий уровень негативного воздействия внешней среды, В – высокий уровень негативного воздействия. Приведенные элементарные стратегии позволили сформировать стратегии природы P1-P1024, отдельные стратегии приведены в таблице 2.

Таблица 2. Фрагменты матриц стратегий ЛПП и стратегий природы

Стратегии ЛПП	N1	N2	N3	...	N10
A1	C1	C1	C1	...	C1
A2	C2	C1	C1	...	C1
A3	C1	C2	C1	...	C1
...
A1024	C2	C2	C2	...	C2

Стратегии природы	N1	N2	N3	...	N10
P1	Н	Н	Н	...	Н
P2	В	Н	Н	...	Н
P3	Н	В	Н	...	Н
...
P1024	В	В	В	...	В

Значения параметров q_i , X_i по исследуемым видам риска для различных комбинаций стратегий природы и ЛПП, оценены экспертно. В таблице 3 приведены значения экспертных оценок, к примеру, для рисков N1, N2, N5, N8.

Таблица 3. Фрагмент таблицы со значениями параметров q_i , %, X_i , % при заданных стратегиях управления рисками, реализуемой стратегии природы для рисков N1, N2, N5, N8

Внешняя среда	Риск N1				Риск N2				Риск N5				Риск N8			
	C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
	q1	X1	q1	X1	q2	X2	q2	X2	q5	X5	q5	X5	q8	X8	q8	X8
Н	9	14	9	7	15	10	7	5	7	20	3	9	17	14	9	3
В	20	25	20	8	30	18	15	12	13	30	10	25	27	23	18	16

На основе данных таблицы 3 построена матрица параметров игры для различных комбинаций стратегий игрока (ЛПП) и природы, фрагмент которой представлен в таблице 4. На основании данных из таблицы 4 проведен расчёт продолжительности строительства объекта методом Монте-Карло в программном комплексе Oracle Primavera Risk Analysis, получены значения оценки продолжительности срока строительства с вероятностью (надежностью) 0.9 (таблица 5) для некоторого набора стратегий D.

Расчет элементов платежных матриц осуществляется по методу Монте-Карло на основе сетевого графика работ с учетом возможных комбинаций рисков, и последствий их наступления. Для адекватной оценки критерия необходимо проводить до нескольких тысяч итераций моделирования. Для выполнения каждого расчета осуществляется настройка параметров сетевого графика и рисков. Вышесказанное приводит к существенным

вычислительным и временным затратам на оценку параметров платежной матрицы по выбранным критериям при большом количестве стратегий ЛПР и природы.

Таблица 4. Фрагмент матрицы параметров $q_i, \%$; $X_i, \%$

Стратегии ЛПР (А) и природы (Р)		Параметры, $q_i, \%$; $X_i, \%$																			
		N1		N2		N3		N4		N5		N6		N7		N8		N9		N10	
		q1	X1	q2	X2	q3	X3	q4	X4	q5	X5	q6	X6	q7	X7	q8	X8	q9	X9	q10	X10
A1	P1	9	14	15	10	15	5	10	3	7	20	17	8	20	7	17	14	12	5	28	17
A128	P384	20	8	15	12	15	4	10	5	10	25	15	10	24	9	17	14	27	23	28	17
A384	P1024	20	8	15	12	15	4	10	5	10	25	15	10	24	9	27	23	15	7	60	40
A640	P1	9	7	7	5	15	2	10	1	3	9	9	5	10	4	17	14	12	5	15	13
A768	P896	20	8	15	12	15	4	10	5	10	25	15	10	24	9	9	3	20	15	39	25
A896	P640	20	8	15	12	15	4	10	5	10	25	15	10	24	9	17	14	5	1	39	25
A1024	P1024	20	8	15	12	15	4	10	5	10	25	15	10	24	9	18	16	15	7	39	25

Таблица 5. Оценка продолжительности срока строительства с надежностью 0.9, в днях

Стратегии		Стратегии ЛПР									
		A1	A128	A256	A384	A513	A640	A768	A896	A1024	
Стратегии природы	P1	905	843	822	840	871	810	779	806	774	
	P128	1118	937	912	931	1089	904	878	902	871	
	P256	1156	992	943	988	1127	962	910	956	908	
	P384	1133	956	935	941	1106	929	904	927	882	
	P513	1098	1043	999	1034	967	915	884	905	880	
	P640	1303	1124	1102	1128	1166	993	965	987	957	
	P768	1349	1167	1131	1165	1199	1048	998	1045	997	
	P896	1322	1140	1127	1127	1181	1013	993	996	957	
	P1024	1362	1186	1145	1172	1229	1061	1019	1049	1006	

Для организации эффективного вычислительного процесса предлагается по ключевым рассчитанным значениям с использованием метода наименьших квадратов построить аппроксимирующую функцию для вычисления остальных элементов платежной матрицы. В качестве независимых переменных в модели аппроксимации используются оценки для вероятностей возникновения рисков и параметры оценок влияния на продолжительность проекта по видам риска при соответствующей стратегии, т.е. для наборов параметров $X_i, i=1,..10$ и $q_i, i=1,..10$ (фрагмент набора данных представлен в таблице 4) были рассчитаны: математическое ожидание (X_{aver}, q_{aver}), среднее квадратическое отклонение (X_{sq}, q_{sq}), минимальное значение (X_{min}, q_{min}), максимальное значение (X_{max}, q_{max}), медиана (X_{med}, q_{med}),

$S = \sum_{i=1}^N X_i^{(k,l)} \cdot q_i^{(k,l)}$ для последовательностей $X_i^{(k,l)}$ и $q_i^{(k,l)}$ соответственно, для каждой пары стратегий A_k, P_l . В качестве зависимой переменной выступает выбранный целевой критерий: продолжительность строительства с надежностью 0.9 при выборе ЛПР стратегии k , и реализации природой стратегии l . Наилучшая модель аппроксимации для продолжительности строительства с надежностью 0.9 имеет вид:

$$\hat{y} = 817,782 + 0,157 * S + 18,414 * X_{min} - 1,659 * X_{max} + 0,292 * X_{med} + 42,226 * X_{aver} + 78,717 * X_{sq} - 42,377 * q_{min} + 9,483 * q_{max} - 33,891 * q_{med} + 27,341 * q_{aver} - 150,908 * q_{sq}$$

Качество модели аппроксимации: $R^2=0,92$, Mean Percent Error = -0,12. На основании построенной модели оцениваются значения для продолжительности строительства с надежностью 0.9 для каждой пары стратегий, не вошедших во множество D .

На основании построенных моделей были оценены значения критерия для остальных стратегий с помощью разработанного авторами программного инструмента. Далее на основе сформированной платежной матрицы определена стратегия, к примеру, по критерию Лапласа:

стратегия A1014 (C2, C2, C2, C2, C2, C2, C1, C2, C2, C1), значение критерия Лапласа для оптимальной стратегии 751,357 дней. Таким образом, по выбранному целевому критерию и критерию принятия решений целесообразно в качестве стратегии управления по рискам N1-N6, N8, N9 выбрать вариант C2 – «существенное снижение риска», по рискам N7, N10 стратегию C1 – «снижение риска». Аналогично могут быть построены модели, например, для оценки значения средней продолжительности проекта, вероятности завершения строительства в планируемый срок и других характеристик закона распределения продолжительности строительства.

Заключение. В работе предложен алгоритм решения задачи выработки стратегии управления рисками объекта строительства, который позволяет моделировать продолжительность строительства объектов в условиях рисков. Решены задачи: выявлены ключевые риски, влияющие на строительные проекты; разработана модель, описывающая план реализации строительства объекта с учетом рискованных ситуаций; предложена методика формирования стратегий принятия решений; проведена апробация методики на примере выявленных видов риска. За счет введения этапа аппроксимации значений платежной матрицы по характеристикам законов распределения параметров, характеризующих стратегии ЛПР и природы, алгоритм может быть масштабирован на большое количество рисков.

Разработанный инструментарий позволит эффективно управлять рисками в строительных проектах. Предложенный подход обеспечивает переход от качественной оценки рисков к количественно обоснованному выбору управленческих решений. Использование методов имитационного моделирования и теории игр позволяет учитывать неопределенность внешней среды, вариативность сценариев реализации рисков и их совокупное влияние на сроки строительства. Данный подход может иметь высокую практическую значимость при реализации инвестиционно-строительных проектов и возможность интеграции в систему управления рисками на различных этапах жизненного цикла инвестиционно-строительного проекта.

Перспективы дальнейших исследований могут быть связаны с увеличением количества критериев, включением стоимостных и ресурсных показателей, а также автоматизацией расчетных процедур.

Список источников

1. Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 22.01.2025).
2. Цопа Н.В. О необходимости применения риск-ориентированных методов для обеспечения устойчивости инвестиционно-строительного проекта / Н.В. Цопа // Строительство и техногенная безопасность, 2017. – № 7 (59). – С. 25–35.
3. Духанина Е.В. Реализация риск-ориентированного подхода в управлении инвестиционно-строительным процессом / Е.В. Духанина, А.Т. Хаметова // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15. – № 2. – URL: <https://esj.today/PDF/10SAVN223.pdf> (дата обращения: 25.01.2025).
4. Дмитриевна Г.Н. Современные проблемы управления предприятиями в условиях неопределенности / Г.Н. Дмитриевна, П.Ю. Рифатовна, П.В. Анатольевич // Стратегии устойчивого развития: социальные, экономические и юридические аспекты, 2024. – С. 135–136.
5. Тогузова И.З. Управление рисками в современной корпорации / И.З. Тогузова, Е.И. Антонова, Д.А. Гульчеева. // Аудиторские ведомости, 2024. – № 1. – С. 177-182. – DOI: 10.24412/1727-8058-2024-1-177-182. – EDN: DERCGN.
6. Забелин А.А. Управление инвестиционными рисками / А.А. Забелин // Образование и право, 2023. – № 11. – С. 236–242. – EDN: AVPLKA.
7. Вавилин Я.А. Применение теории игр для выбора методов риск-менеджмента / Я.А. Вавилин // Компетентность, 2023. – № 5. – С. 42–46. – DOI: 10.24412/1993-8780-2023-5-42-46. – EDN: XQYAPX.
8. Петриченко Д.Г. Решение ситуационных задач в сфере недвижимости в условиях неопределенности / Д.Г. Петриченко, Г.С. Петриченко // Вестник Академии знаний, 2023. – № 1 (54). – С. 400–405. – EDN: TOBOTX.

9. Ахвердиева С.Г. Воздействие экономических рисков на эффективность проектов в нефтегазовой отрасли / С.Г. Ахвердиева, Т.В. Кириченко, Е.В. Лемешева, и др. // Финансовые рынки и банки, 2024. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozdeystvie-ekonomicheskikh-riskov-na-effektivnost-proektov-v-neftegazovoy-otrasli/viewer> (дата обращения: 01.06.2024).
10. Панюшкин В.А. Применение теории игр в строительстве / В.А. Панюшкин // Экономика, менеджмент, сервис: современные проблемы и перспективы: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Омск, 14–15 ноября 2022 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2022. – С. 150–154. – EDN NMJHA.
11. Капусто А.В. Организация финансового планирования деятельности подрядчика в условиях полной неопределенности с применением аппарата теории игр / А.В. Капусто, С.Н. Костюкова // Цифровизация: экономика и управление производством: материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, Минск, 31 января – 12 февраля 2022 года. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2022. – С. 138–141. – EDN: GYNWMU.
12. Федосов С.В. Особенности использования отечественного и зарубежного инструментария имитационного моделирования строительных конструкций зданий и сооружений / С.В. Федосов, В.Н. Федосеев, И.С. Зайцев, И.А. Зайцева // Умные композиты в строительстве, 2023. – Т. 4, вып. 2. – С. 18–31.
13. Тараненко С.Н. Анализ математических моделей в области оценки рисков кредитных организаций / С.Н. Тараненко // Инновационная наука, 2024. – № 2–1. – С. 56–61.
14. Ковалева Е.А. Модуль «Планирование в условиях рисков» программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства» / Е.А. Ковалева, Я.М. Иванько // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 3(27). – С. 135–147. – DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.013.
15. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide) 6th edition. Project Management Institute (PMI), 2017 756 с.
16. Строительство в российских регионах: итоги 2023 года. – URL: <https://sherpagroup.ru/analytics/gkvpvx45> (дата обращения: 08.05.2024).
17. Макарова Д.К. Влияние инфляции на деятельность строительных фирм / Д.К. Макарова, Е.А. Малаева // Экономика и социум, 2016. – № 12-2 (31). – С. 148–151.
18. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 г. № 309. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542> (дата обращения: 20.05.2024).
19. Главная страница. Минстрой России. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/> (дата обращения: 20.05.2024).
20. Высокий сезон в грузоперевозках: особенности и вызовы в 2023 году. – URL: <https://monopoly.ru/blog/dengi/vysokij-sezon-v-gruzoperevozkah-osobennosti-i-vyzovy-v-2023-godu/> (дата обращения: 20.05.2024).
21. Управление строительными проектами на основе фи-девелопмента. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-stroitelnyimi-proektami-na-osnove-fi-developmenta/viewer> (дата обращения: 20.05.2024).
22. Управление проектами в строительстве – описание, задачи, классификация строительства, инструменты для управления проектом в строительстве. – URL: https://1solution.ru/events/articles/upravlenie-proektami-v-stroitelstve/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (дата обращения: 20.05.2024).
23. Главгосэкспертиза назвала типичные ошибки в проектной документации. СПО НОССИ. – URL: https://sro-nossi.ru/novosti_sro/2022_08_18_glavgosexpertiza_nazvala_tipichnye_oshibki_v_proektnoy_dokumentatsii (дата обращения: 08.05.2024).
24. Сколько людей получает производственные травмы. – URL: <https://journal.tinkoff.ru/injuries-at-work-stat/> (дата обращения: 20.05.2024).
25. Сидоренко Н.А. Анализ и управление рисками при организации строительных работ / Н.А. Сидоренко, О.Н. Яркова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, Омск, 23–24 ноября 2023 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2023. – С. 403–409. – EDN URWHPM.
26. Трудовая миграция из Таджикистана в 2023 году сократилась на 16%. – URL: <https://www.interfax.ru/world/945780> (дата обращения: 08.05.2024).

Сидоренко Никита Александрович. Аспирант Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. AuthorID: 1165455, SPIN: 3071-3684, ORCID: 0000-0002-9071-8424. nikitasidorenko1998@gmail.com. 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская улица, дом 4, каб. 204/С.

Яркова Ольга Николаевна. К.э.н., доцент, доцент кафедры технологий информационного и

математического моделирования Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. AuthorID: 568918, SPIN: 3146-5581, ORCID: 0000-0002-8745-3031. Yarkova_on@mail.ru. 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская улица, дом 4, каб. 204/С.

UDC 519.816:519.245:65.012.12

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.011

Algorithm for developing a risk management strategy in construction projects

Nikita A. Sidorenko, Olga N. Yarkova

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Russia, Saint Petersburg, *nikitasidorenko1998@gmail.com*

Abstract. This article is devoted to the development of mathematical tools that allow for the justification of strategic risk management decisions when implementing a construction plan within the established time frame. The process of risk management in the construction industry requires construction companies to adapt to modern realities and implement modern risk management systems for the successful implementation of construction projects. One of the most important indicators of project implementation effectiveness is the compliance of the construction project implementation deadline with the planned values. It is important to correctly assess the construction deadlines, taking into account the risks affecting the project implementation. The purpose of the work is to develop tools that allow modeling the duration of a construction project implementation under risk conditions. The paper analyzes existing approaches to risk management in construction projects and proposes a methodology for developing a risk management strategy, tested on the example of the construction of a typical residential building. For the project under consideration, key risks affecting the duration of construction have been identified. An example of the formation of a matrix of controllable parameters is shown. A method for constructing a game matrix based on a network graph of the construction plan for given player and nature strategies is described: the duration of work is simulated using the Monte Carlo method, and a probability distribution of the project completion time is obtained; the possibility of reducing the computational complexity of the algorithm by approximating a series of game matrix values using the least squares method is shown; the game matrix is constructed, for example, based on the characteristics of the probability distribution “construction period with a given probability (reliability)”, and a decision-making strategy based on Laplace's principle is defined. The application of the developed toolkit for assessing the risks of project failure within the established deadlines will allow for effective risk management in construction projects. The proposed approach may be of high practical significance in the implementation of construction projects and can be integrated into the risk management system at various stages of the construction project life cycle.

Keywords: risk management, statistical modeling, game theory, risk-oriented approach, construction projects

References

1. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki [Federal State Statistics Service]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 01/22/2025)
2. Tsopa N.V. O neobkhodimosti primeneniya risk-orientirovannykh metodov dlya obespecheniya ustojchivosti investitsionno-stroitel'nogo proekta [On the necessity of using risk-oriented methods to ensure the sustainability of an investment and construction project]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'* [Construction and technological safety], 2017, no. 7 (59), pp. 25–35.
3. Dukhanina E.V., Khametova A.T. Realizatsiya risk-orientirovannogo podkhoda v upravlenii investitsionno-stroitel'nym protsessom [Implementation of a risk-based approach in the management of the investment and construction process]. *Vestnik evrazijskoj nauki* [The Eurasian Scientific Journal], 2023, vol. 15, no. 2. Available at: <https://esj.today/PDF/10SAVN223.pdf> (accessed 01/25/2025).
4. Dmitrievna G.N., Rifatovna P.Yu., Anatol'evich P.V. Sovremennye problemy upravleniya predpriyatiyami v usloviyakh neopredelennosti [Contemporary problems of enterprise management in conditions of uncertainty]. *Strategii ustojchivogo razvitiya: sotsial'nye, ekonomicheskie i yuridicheskie aspekty* [Sustainable development strategies: social, economic, and legal aspects], 2024, pp. 135–136.

5. Toguzova I.Z., Antonova E.I., Gul'cheeva D.A. Upravlenie riskami v sovremennoj korporatsii [Risk management in a modern corporation]. *Auditorskie vedomosti* [Audit journal], 2024, no. 1, pp. 177-182, DOI: 10.24412/1727-8058-2024-1-177-182, EDN: DERCGN.
6. Zabelin A.A. Upravlenie investitsionnymi riskami [Investment risk management]. *Obrazovanie i pravo* [Education and law], 2023, no. 11, pp. 236–242, EDN: AVPLKA.
7. Vavilin Ya.A. Primenenie teorii igr dlya vybora metodov risk-menedzhmenta [Game theory application to the choice of risk management methods]. *Kompetentnost'* [Competency], 2023, no. 5, pp. 42–46, DOI: 10.24412/1993-8780-2023-5-42-46, EDN: XQYAPX.
8. Petrichenko D.G., Petrichenko G.S. Reshenie situatsionnykh zadach v sfere nedvizhimosti v usloviyakh neopredelennosti [Solving real estate situational in conditions of uncertain]. *Vestnik Akademii znaniy* [Academy of Knowledge Bulletin], 2023, no. 1 (54), pp. 400–405, EDN: TOBOTX.
9. Akhverdieva S.G., Kirichenko T.V., Lemesheva E.V., Kazak A.S., Komzolov A.A. Vozdejstvie ekonomicheskikh riskov na effektivnost' proektov v neftegazovoy otrasli [Impact of economic risks on the efficiency of projects in the oil and gas industry]. *Finansovye rynki i banki* [Financial markets and banks], 2024, no. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozdeystvie-ekonomicheskikh-riskov-na-effektivnost-proektov-v-neftegazovoy-otrasli/viewer> (accessed 06/01/2024).
10. Panyushkin V.A. Primenenie teorii igr v stroitel'stve [Application of game theory in construction]. *Ekonomika, menedzhment, servis: sovremennye problemy i perspektivy: materialy IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Omsk, 14–15 noyabrya 2022 goda. – Omsk: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet [Economics, Management, Service: Contemporary Issues and Prospects: Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference, Omsk, November 14–15, 2022. Omsk: Omsk State Technical University], 2022, pp. 150–154, EDN: NMJHA.
11. Kapusto A.V., Kostyukova S.N. Organizatsiya finansovogo planirovaniya deyatelnosti podryadchika v usloviyakh polnoj neopredelennosti s primeneniem apparata teorii igr [Organization of financial planning for contractor activities in conditions of complete uncertainty using game theory]. *Tsifrovizatsiya: ekonomika i upravlenie proizvodstvom: materialy 86-j nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava*, Minsk, 31 yanvarya – 12 fevralya 2022 goda, Minsk: Belorusskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet [Digitalization: Economics and Production Management: Proceedings of the 86th Scientific and Technical Conference of Faculty Members, Minsk, January 31–February 12, 2022. – Minsk: Belarusian State Technological University], 2022, pp. 138–141, EDN: GYNWMU.
12. Fedosov S.V., Fedoseev V.N., Zajtsev I.S., Zajtseva I.A. Osobennosti ispol'zovaniya otechestvennogo i zarubeznogo instrumentariya imitatsionnogo modelirovaniya stroitel'nykh konstruktivnykh zdaniy i sooruzhenij [Features of domestic and foreign simulation tools use for structural modeling of civil engineering buildings and constructions]. *Umnye kompozity v stroitel'stve* [Smart composites in construction], 2023, vol. 4, no. 2, pp. 18–31.
13. Taranenko S.N. Analiz matematicheskikh modelej v oblasti otsenki riskov kreditnykh organizatsij [Analysis of mathematical models in the field of credit institution risk assessment]. *Innovatsionnaya nauka* [Innovative science], 2024, no. 2–1, pp. 56–61.
14. Kovaleva E.A., Ya.M. Ivan'ov. Modul «Planirovanie v usloviyakh riskov» programmno kompleksa «Ekologo-matematicheskoe modelirovanie agrarnogo proizvodstva» [Module "Planning under risks" of the software package "Ecological and mathematical modeling of agricultural production"]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2022, no. 3(27), pp. 135-147, DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.013.
15. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide). Project Management Institute (PMI), 2017. – 756 pp.
16. Stroitel'stvo v rossijskikh regionakh: itogi 2023 goda [Construction in Russian regions: results for 2023]. Available at: <https://sherpagroup.ru/analytics/gkvp45> (accessed 05/08/2024).
17. Makarova D.K., Malaeva E.A. Vliyanie inflyatsii na deyatelnost' stroitel'nykh firm [influence of inflation on activity of civil engineering firms]. *Ekonomika i sotsium* [Economy and society], 2016, no. 12-2 (31), pp. 148–151.
18. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federatsii ot 07.05.2024 g. № 309 [Decree of the President of the Russian Federation No. 309 dated May 7, 2024]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542> (accessed 05/20/2024).
19. Glavnaya stranitsa. Ministroy Rossii [Home page. Ministry of Construction of Russia]. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/> (accessed 05/20/2024).
20. Vysokij sezon v gruzoperevozkakh: osobennosti i vyzovy v 2023 godu [High season in freight transportation: features and challenges in 2023]. Available at: <https://monopoly.ru/blog/dengi/vysokij-sezon-v-gruzoperevozkah-osobennosti-i-vyzovy-v-2023-godu/> (accessed 05/20/2024).

21. Upravlenie stroitel'nymi proektami na osnove fi-developmenta [Construction project management based on fi-development]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-stroitel'nymi-proektami-na-osnove-fi-developmenta/viewer> (accessed 05/20/2024).
22. Upravlenie proektami v stroitel'stve – opisanie, zadachi, klassifikatsiya stroitel'stva, instrumenty dlya upravleniya proektom v stroitel'stve [Project management in construction – description, tasks, classification of construction, tools for managing construction projects]. Available at: https://1solution.ru/events/articles/upravlenie-proektami-v-stroitel'stve/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (accessed 05/20/2024).
23. Glavosekspertiza nazvala tipichnye oshibki v proektnoj dokumentatsii. SRO NOSSI [The Main State Expert Review Board has identified typical errors in project documentation. SRO NOCCI]. Available at: https://sro-nossi.ru/novosti_sro/2022_08_18_glavosekspertiza_nazvala_tipichnye_oshibki_v_proektnoy_dokumentatsii (accessed 05/08/2024).
24. Skol'ko lyudej poluchaet proizvodstvennye travmy [How many people suffer work-related injuries]. Available at: <https://journal.tinkoff.ru/injuries-at-work-stat/> (accessed 05/20/2024).
25. Sidorenko N.A., Yarkova O.N. Analiz i upravlenie riskami pri organizatsii stroitel'nykh rabot [risk analysis and management in the organisation of construction works] *Arkhitekturno-stroitel'nyj i dorozhno-transportnyj kompleksy: problemy, perspektivy, innovatsii: sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, Omsk, 23–24 noyabrya 2023 goda*. Omsk: Sibirskij gosudarstvennyj avtomobil'no-dorozhnyj universitet (SibADI) [Architectural, Construction, Road, and Transport Complexes: Problems, Prospects, Innovations: Collection of Materials from the VIII International Scientific and Practical Conference, Omsk, November 23–24, 2023. – Omsk: Siberian State Automobile and Road University (SibADI)], 2023, pp. 403–409, EDN: URWHPM.
26. Trudovaya migratsiya iz Tadjikistana v 2023 godu sokratilas' na 16% [Labor migration from Tajikistan decreased by 16% in 2023]. Available at: <https://www.interfax.ru/world/945780> (accessed 05/08/2024).

Sidorenko Nikita Aleksandrovich. *Post-graduate student of Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. AuthorID: 1165455, SPIN: 3071-3684, ORCID: 0000-0002-9071-8424, nikitaidorenko1998@gmail.com. 190005, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya Street, Building 4, Office 204/C*

Yarkova Olga Nikolaevna. *PhD in Economics, Associate Professor, Department of Information and Mathematical Modeling Technologies, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. AuthorID: 568918, SPIN: 3146-5581, ORCID: 0000-0002-8745-3031, Yarkova_on@mail.ru. 190005, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya Street, Building 4, Office 204/C.*

Статья поступила в редакцию 25.09.2025; одобрена после рецензирования 24.10.2025; принята к публикации 10.02.2026.

The article was submitted 09/25/2025; approved after reviewing 10/24/2025; accepted for publication 02/10/2026.

Моделирование эффективности деятельности университета с использованием электронной информационно-образовательной среды

Баймаков Александр Александрович, Иваньо Ярослав Михайлович,
Федурин Нина Ивановна

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
Россия, п. Молодежный, Иркутский район, Иркутская область, *web@igsha.ru*

Аннотация. В статье приведены результаты исследования, целью которого являлась разработка модуля «Управление образовательными программами», как составной части электронной информационно-образовательной среды (ЭИОС) университета с математическим и алгоритмическим обеспечением для прогнозирования показателей аккредитационного мониторинга, что способствует повышению качества управления образовательным процессом. Исследование основано на анализе многолетних данных по 20 образовательным программам Иркутского государственного аграрного университета. Научная новизна работы состоит в систематизации процессов сбора, хранения и обработки данных, а также в разработке специализированных алгоритмов прогнозирования, адаптированных к особенностям статистических параметров временных рядов показателей мониторинга. В отличие от существующих разработок, предлагаемые алгоритмы реализованы в виде практического инструмента, интегрированного в ЭИОС ВУЗа. Для прогнозирования таких показателей, как средний балл ЕГЭ, доля успешно завершивших обучение и доля трудоустроившихся выпускников, применялся комплекс методов, включающий корреляционно-регрессионный анализ, методы экспертных оценок и вероятностное моделирование на основе трехпараметрического степенного гамма-распределения. Предложено дифференцировать точность оценки прогнозов на основе учета уровня подготовки абитуриентов. Разработанный модуль апробирован на реальных данных, что позволило оценить точность прогнозов. Выполнен ретроспективный прогноз основных показателей аккредитации, значения которого сравнивались с фактическими данными. Средняя относительная погрешность прогноза составила 12,8% для среднего балла ЕГЭ, 18,8% – для доли завершивших обучение и 6,7% – для доли трудоустроившихся выпускников. Полученные результаты демонстрируют практическую применимость модуля для заблаговременной оценки соответствия образовательных программ аккредитационным требованиям и формирования обоснованных управленческих решений.

Ключевые слова: аккредитация, мониторинг, образовательная программа, электронно-информационная образовательная среда, моделирование, управление

Цитирование: Баймаков А.А. Моделирование эффективности деятельности университета с использованием электронной информационно-образовательной среды / А.А. Баймаков, Я.М. Иваньо, Н.И. Федурин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 164-179 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.012.

Введение. Повышение конкурентоспособности и эффективности деятельности университета, улучшение качества образования [1], готовность к выполнению аккредитационных показателей остается актуальной проблемой. Большое внимание учредители ВУЗов уделяют официальному мониторингу Минобрнауки России [2, 3], а также рейтингам, в частности, агентств RAEX [4] и Интерфакс [5]. Помимо российских ВУЗов, многие университеты участвуют в международных рейтингах [6, 7], поэтому с позиции управления университетом необходим инструментарий, позволяющий оценивать деятельность ВУЗа и определять перспективы его развития с учетом динамики требований нормативных и законодательных документов. К таким инструментам относятся информационные системы. Важной частью системы образовательного процесса является электронная информационно-образовательная среда (ЭИОС). Согласно Ф3 от 29.12.2012 №273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» ЭИОС представляет собой совокупность информационных технологий, технических средств, электронных информационных ресурсов и образовательных ресурсов, обеспечивающих освоение

обучающимися образовательных программ в полном объеме независимо от места нахождения обучающихся.

Многие исследователи обращают внимание на необходимость формализации направлений деятельности ВУЗа [8], применения методов математического моделирования и разработки информационных систем для оценки рейтинга профессорско-преподавательского состава [9, 10], использования искусственного интеллекта [11, 12] в автоматизации разных направлений деятельности университета.

Основная цель ЭИОС – создание максимально комфортных условий для обучения и взаимодействия студентов и преподавателей. Ключевыми компонентами ЭИОС являются электронные курсы, системы управления обучением, базы данных, а также инструменты для дистанционного обучения.

Эффективная функционирования ЭИОС способствует не только повышению качества образования, но и улучшению управления деятельностью ВУЗом.

Цель работы – разработка модуля «Управление образовательными программами», как составной части электронной информационно-образовательной среды с математическим и алгоритмическим обеспечением для прогнозирования показателей аккредитационного мониторинга.

Научная новизна исследования состоит в систематизации процессов сбора, хранения и накопления данных, выделения особенностей информации о показателях образовательного процесса для определения адекватных методов и алгоритмов применительно к моделированию принятия управленческих решений.

Материалы и методы. При подготовке статьи использованы многолетние данные по среднему баллу ЕГЭ поступающих, сведения о численности выпускников и выпускников целевого набора, данные о трудоустройстве выпускников, информация о профессорско-преподавательском составе, информация о наличии электронной информационно-образовательной среды и внутренней системе оценки качества образования. Для решения задачи управления качеством образования использованы методы сбора, систематизации и обработки данных. При оценке показателей образовательных программ предложен комплекс методов прогнозирования в зависимости от особенностей данных, включающий регрессию, авторегрессию, сравнения последующего и предыдущего уровня с указанием достижимого результата и экспертные оценки. Для временных рядов, обладающих стохастическими свойствами, использована вероятностная оценка показателя.

Основные результаты. Одним из обязательных условий деятельности ВУЗа является наличие электронной информационно-образовательной среды (ЭИОС). В Иркутском государственном аграрном университете разработана собственная электронная информационно-образовательная среда для ВУЗа на основе веб-сервера Apache2, языков программирования PHP 5.3 и JavaScript, сервере баз данные MySQL 5.5.54 [13-15]. ЭИОС выполняет функции, прежде всего, реализации образовательного процесса – взаимодействия студента и преподавателя. Кроме того, она позволяет определять рейтинги студентов в соответствии с направлениями подготовки бакалавров, магистров и специалистов. В электронной информационно-образовательной среде осуществляется мониторинг работы аспирантов ВУЗа.

Важным аспектом работы является оптимизация сбора, систематизации и обработки данных для моделирования. Часть данных получена из системы 1С: Университет ПРОФ с использованием средств автоматизации. Остальные данные хранятся в электронной информационно-образовательной среде с 2012 года.

Данные о результатах ЕГЭ абитуриентов поступают из федеральной информационной системы государственной итоговой аттестации и приема (ФИС ГИА и приема). Эти данные

вносятся в личные дела абитуриентов в системе 1С Университет ПРОФ. После зачисления абитуриентов в число студентов университета реализуется механизм выгрузки результатов вступительных испытаний в ЭИОС. Результаты вступительных испытаний выгружаются по каждому абитуриенту. В ЭИОС выполняется обработка результатов вступительных испытаний: выбираются абитуриенты, которые поступают только по результатам ЕГЭ, группируются по образовательной программе и записываются в отдельную таблицу базы данных.

Информация о движении контингента фиксируется с помощью документа «Приказы» в 1С Университет ПРОФ. Для освоения обучающимися учебного плана реализован механизм синхронизации базы данных 1С Университет ПРОФ и ЭИОС Иркутского ГАУ. С помощью встроенных функций 1С (регламентное задание) и сервера ЭИОС под управлением операционной системы семейства Linux (планировщик заданий Cron) выполняется выгрузка информации о движении контингента с помощью текстовых файлов формата .csv.

Данные о трудоустройстве выпускников собираются сотрудниками центра по трудоустройству с помощью анкетирования. Результаты анкетирования вносятся в документ «Сведения о трудоустройстве» 1С: Университет ПРОФ. Информация о трудоустройстве выпускников выгружается в ЭИОС и выполняется обработка и группировка данных по каждой образовательной программе.

Для управления качеством образования на основе законодательных и нормативных требований предложено разработать модуль «Управление образовательными программами», как элемент ЭИОС.

Предлагаемый модуль «Управление образовательными программами» включает 4 подмодуля (рис. 1):

- «Средний балл ЕГЭ»;
- «Количество выпускников и трудоустройство»;
- «Состав НПР (научно-педагогических работников)»;
- «Наличие ЭИОС и ВНОКО (внутренняя независимая оценка качества образования)».

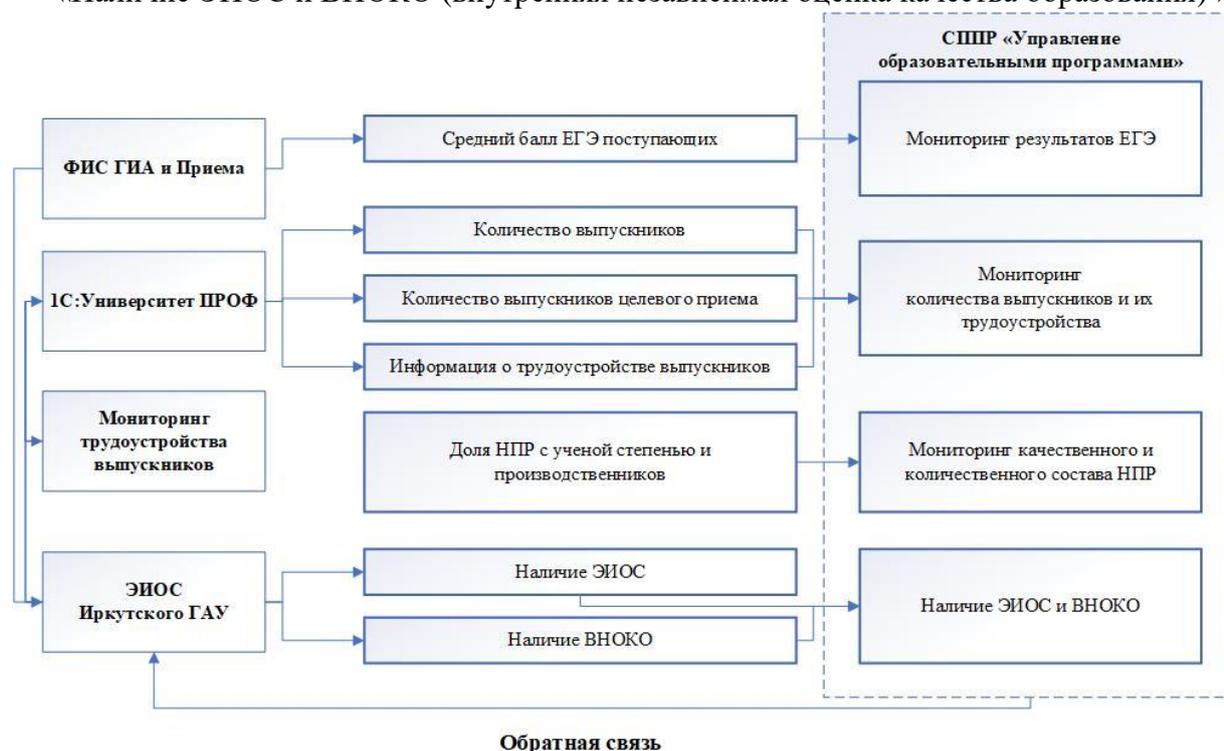


Рис. 1. Группировка исходных данных для модуля «Управление образовательными программами»

Исходные данные для функционирования подмодулей сгруппированы следующим образом:

- средний балл ЕГЭ;
- данные о доле выпускников, успешно завершивших обучение, в т.ч. выпускников целевого обучения, и доля выпускников, трудоустроенных в течение календарного года;
- доля научно-педагогических работников с учеными степенями и доля преподавателей из числа руководителей предприятий;
- наличие ЭИОС и ВНОКО.

Расширение функций ЭИОС связано с мониторингом показателей аккредитации вуза по образовательным программам, оценкой их эффективности и перспективы.

На рисунке 2 показана функциональная модель процесса разработки модуля «Управление образовательными программами». Каждый подмодуль позволяет получать значения определенных показателей эффективности деятельности университета. Результатом их работы является определение динамики показателей внутренней системы оценки качества образования в целом.

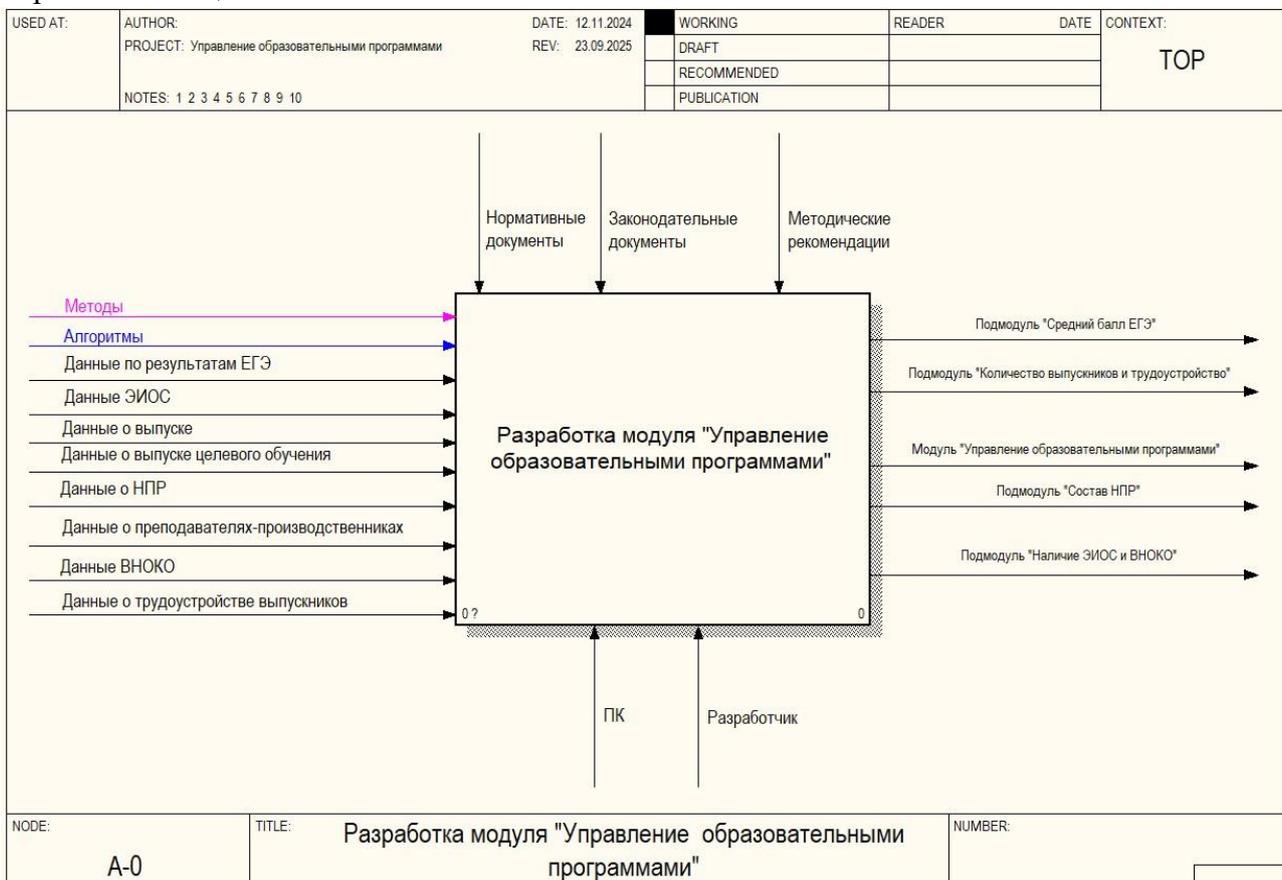


Рис. 2. Функциональная модель разработки модуля «Управление образовательными программами»

На рисунке 3 показана декомпозиция разработки модуля «Управление образовательными программами». Его результатом являются прогностические показатели аккредитационного мониторинга: средний балл ЕГЭ, доля успешно завершивших обучение (в том числе доля успешно завершивших целевое обучение), доля трудоустроившихся выпускников, доля научно-педагогических работников с ученой степенью и званиями, доля научно-педагогических работников из числа предприятий, наличие ЭИОС и ВНОКО.

Приведем описание прогностических методов, основанных на статистической оценке информации, опираясь на данные деятельности Иркутского ГАУ, осуществляющего

образовательную деятельность по 20 образовательным программам высшего образования, которые оцениваются по восьми показателям аккредитации.

Несмотря на тот факт, что в научной литературе [3, 9, 10] описаны различные математические модели управления качеством подготовки специалистов, остаются нерешенными вопросы, связанные с выбором эффективных моделей в зависимости от особенностей информации.

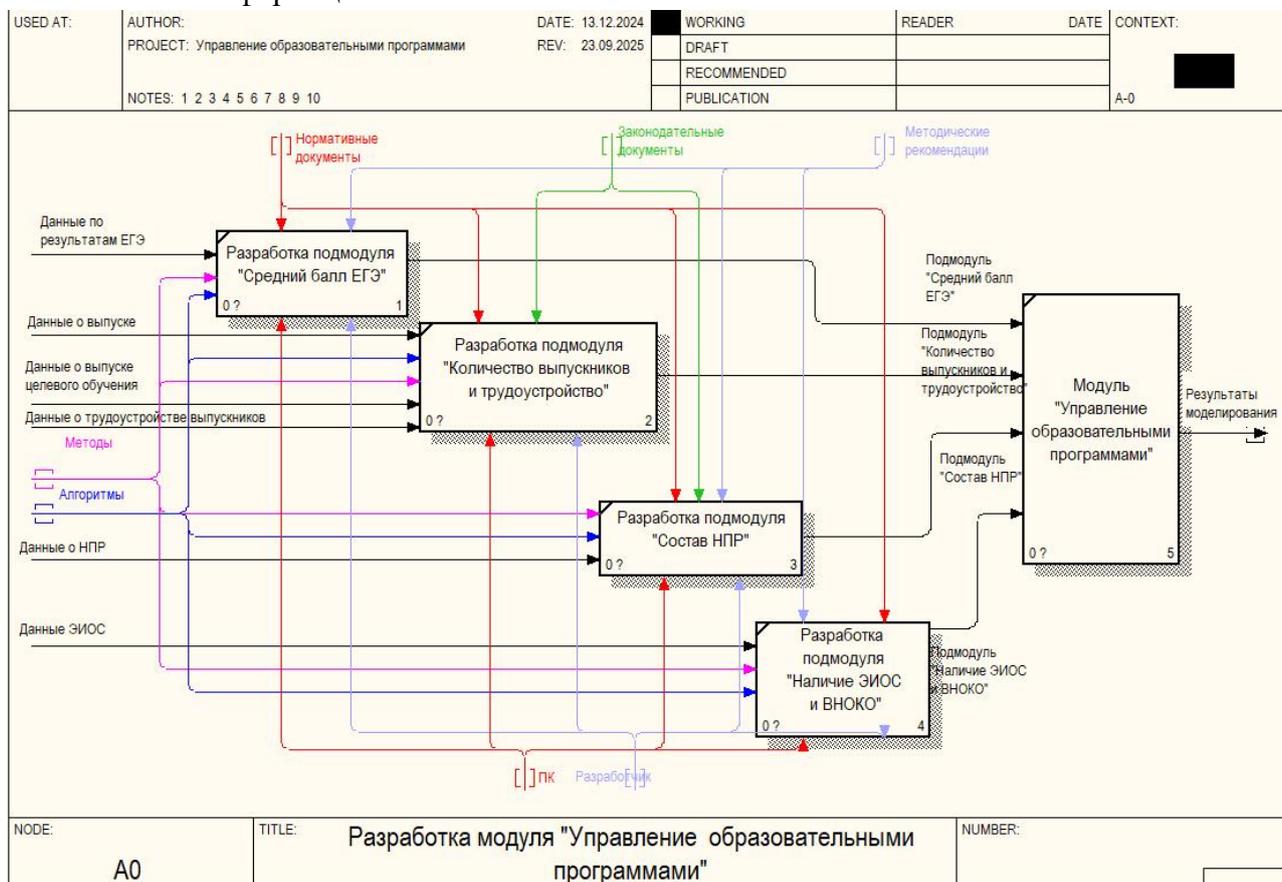


Рис. 3. Декомпозиция разработки модуля «Управление образовательными программами»

Из выделенных групп показателей аккредитационного мониторинга прогнозированию подвергаются, прежде всего, те, которые входят в модули «Средний балл ЕГЭ»; «Количество выпускников и трудоустройство», поскольку показатели «Доля НПП с учеными степенями и званиями», «Наличие ЭИОС и ВНОКО», «Доля НПП из числа руководителей предприятий», «Выпуск студентов целевого набора» относятся к постоянным или слабо изменяющимся величинам.

В таблице 1 приведены фактические показатели аккредитационного мониторинга по 20-ти программам высшего образования на основе данных Иркутского ГАУ за 2023 год.

Предлагается на основе предшествующих многолетних данных и требований Министерства науки и высшего образования России спрогнозировать показатели «Средний балл ЕГЭ», «Доля успешно завершивших обучение (%)» и «Доля трудоустроившихся выпускников» на 2024 год и сравнить результаты с фактическими данными, оценив возможности разных моделей.

Далее рассмотрим модели и прогнозы по каждому показателю (названия столбцов таблицы 1).

Таблица 1. Показатели аккредитационного мониторинга по образовательным программам Иркутского ГАУ за 2023 год

Код программы	Образовательная программа	Средний балл ЕГЭ	Доля успешно завершивших обучение (%)	Доля трудоустроившихся выпускников (%)
06.03.01	Биология	51,0	75,1	92,6
09.03.03	Прикладная информатика	53,0	96,0	94,7
13.03.01	Теплоэнергетика и теплотехника	47,3	61,6	100,0
13.03.02	Электроэнергетика и электротехника	51,8	70,1	90,0
21.03.02	Землеустройство и кадастры	58,2	70,5	100,0
23.03.03	Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов	47,9	65,7	84,3
35.03.01	Лесное дело	49,7	62,5	100,0
35.03.03	Агрохимия и агропочвоведение	48,7	57,6	90,0
35.03.04	Агрономия	53,2	61,0	91,7
35.03.06	Агроинженерия	46,5	56,6	91,7
35.03.07	Технология производства и переработки с.-х. продукции	49,3	67,9	88,9
35.03.08	Водные биоресурсы	49,4	52,8	100,0
35.03.10	Ландшафтная архитектура	53,1	103,8	90,0
36.03.01	Ветеринарно-санитарная экспертиза	52,5	72,6	95,0
36.03.02	Зоотехния	50,9	51,0	100,0
36.05.01	Ветеринария	59,8	208,7	98,0
38.03.01	Экономика	58,1	217,4	88,9
38.03.02	Менеджмент	54,4	33,9	85,7
38.05.01	Экономическая безопасность	52,3	63,8	84,6
44.03.04	Профессиональное обучение	55,2	123,6	84,6

Средний балл ЕГЭ. Проведена статистическая обработка данных среднего балла ЕГЭ абитуриентов, поступивших за период 2019-2023 гг. Анализ показателей более ста временных рядов с помощью корреляционно-регрессионного анализа и оценки их статистических параметров (среднее, среднее квадратическое отклонение, коэффициент асимметрии и автокорреляции), по разным образовательным программам показывает, что временные ряды можно разделить на две группы – случайные и динамико-стохастические. По данным Иркутского ГАУ на основе анализа трендов преобладающее большинство временных рядов являются случайными. Исключение составляет направление подготовки 06.03.01 Биология, где наблюдается тренд увеличения среднего балла ЕГЭ с коэффициентом детерминации $R^2=0,61$:

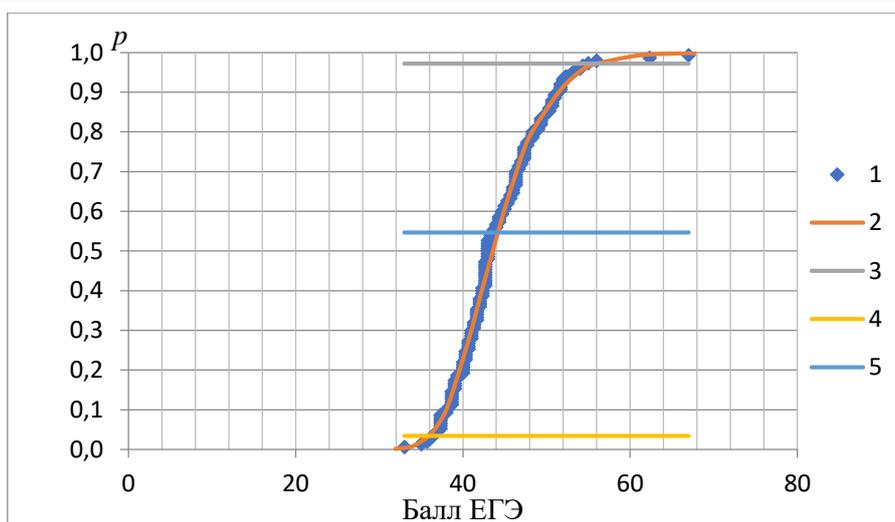
$$y_t = 0,6751t + 47,0, \quad (1)$$

где t – номер года.

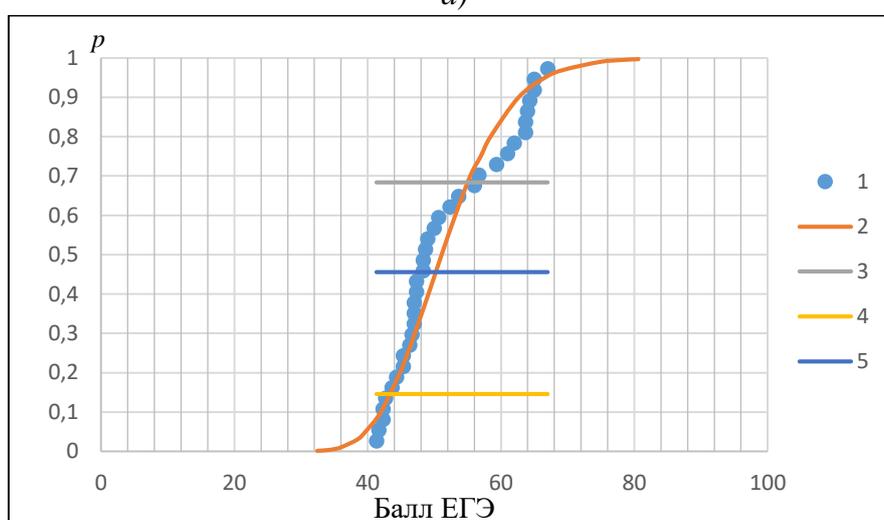
Согласно F -критерию Фишера и t -критерию Стьюдента уравнение регрессии и коэффициент уравнения являются значимыми.

Остальные ряды средних баллов ЕГЭ абитуриентов, поступающих на разные направления подготовки, изменяются случайным образом.

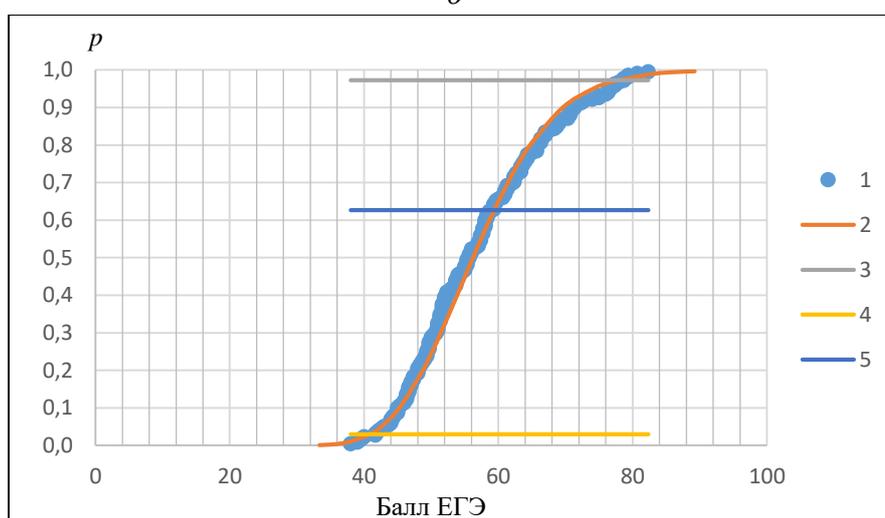
На рисунке 4 показаны графики трехпараметрического степенного гамма-распределения [16], полученные по данным среднего балла ЕГЭ всех абитуриентов, поступивших на приведенные направления подготовки. Эти распределения вероятностей среднего балла абитуриентов характеризуют направления подготовки, соответствующие низким, медианным и высоким значениями оцениваемого показателя. Другими словами, из 20-ти образовательных программ на основе анализа средних значений выбраны три направления с разными уровнями качества абитуриентов.



а)



б)



в)

Рис. 4. Трехпараметрическое степенное гамма-распределение для направлений подготовки 35.03.06 Агроинженерия (а), 38.03.02 Менеджмент (б), специальности 36.05.01 Ветеринария (в) по данным среднего балла ЕГЭ за 2019-2023 гг.:

1 – эмпирическая функция; 2 – аналитическая функция распределения; 3 – вероятность превышения среднего максимума; 4 – вероятность среднего минимума; 5 – вероятность среднего значения

Полученные результаты можно использовать для прогнозирования среднего балла ЕГЭ для образовательных программ. Для этого предлагается ориентироваться на средние значения с учетом дополнительного слагаемого с коэффициентом k , определяющим рост этого показателя:

$$y_t = \bar{y}_t + k\bar{y}_t, \quad (2)$$

где \bar{y}_t – среднее значение ЕГЭ за многолетний период, k – коэффициент роста, назначаемый в зависимости от выделенных групп образовательных программ.

Предложены три группы образовательных программ с учетом увеличения среднего балла ЕГЭ: с низким, средним и высоким значением. Коэффициент k является управляемой величиной в зависимости от факторов, связанных с уровнем подготовки учеников, прежде всего, в сельских школах, требованиями учредителя, правилами приема вуза, тенденциями популярности профессий.

В конкретном случае для образовательных программ с низким баллом ЕГЭ коэффициент роста k принят равным 0,1, со средним значением – 0,08, а с высоким баллом – 0,06. Эти коэффициенты определяются с помощью экспертных оценок. В экспертный совет входят проректор по учебной работе, начальник учебного отдела, декан или директор института, заведующий кафедрой и руководитель образовательной программы. При этом значения k определяются для каждой образовательной системы.

На рис. 5 показаны прогнозные значения среднего балла ЕГЭ на 2024 год по образовательным программам Иркутского ГАУ согласно трендовой модели (1) и расчетной формуле (2). Помимо этого, на рис. 6 обобщены результаты стохастического моделирования средних баллов ЕГЭ по трем выделенным образовательным программам. Здесь приведены средние баллы по средним значениям, средним максимумам и минимумам за многолетний период и их вероятности p_c , p_{max} , p_{min} . Кроме того, приведены значения наибольших и наименьших баллов и их вероятности, полученные по трёхпараметрическому степенному гамма-распределению [16].

Приведенные алгоритмы прогнозирования зависят от особенностей временных рядов и внешних факторов, связанных с тенденциями высшего образования. Поэтому конкретные примеры отражают специфику контингента абитуриентов, поступающих в аграрный университет. В зависимости от статистических характеристик временных рядов показатели аккредитационного мониторинга могут быть разделены на детерминированные, случайные и динамико-стохастические величины, поэтому в зависимости от этих особенностей определяются методы и алгоритмы прогнозирования. С этой точки зрения по среднему баллу ЕГЭ университеты могут прогнозировать ЕГЭ на основе сильно устойчивых, устойчивых и неустойчивых тенденций.

Предложенные модель и алгоритм для прогнозирования среднего балла ЕГЭ с учетом разных групп уровней реализованы в модуле «Управление образовательными программами» электронной информационно-образовательной среды Иркутского ГАУ. Инструментарий для разработки модуля включает в себя стандартные математические и статистические функции языка PHP, сервер базы данных MySQL. Для графического представления результатов используются плагины и фреймворки Bootstrap, Charts и Morris Charts.

Полученные прогностические показатели сравниваются с нормативными показателями аккредитационного мониторинга и выделяются цветом, какой показатель ОП выполняется или не выполняется.

Код программы	Образовательная программа	Средний балл ЕГЭ	Доля успешно завершивших обучение (%)	Доля трудоустроившихся выпускников (%)
06.03.01	Биология	52,13	75,1	92,6
09.03.03	Прикладная информатика	53,12	96,0	94,7
13.03.01	Теплоэнергетика и теплотехника	49,29	61,6	100,0
13.03.02	Электроэнергетика и электротехника	52,98	70,1	90,0
21.03.02	Землеустройство и кадастры	58,51	70,5	100,0
23.03.03	Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов	49,75	65,7	84,3
35.03.01	Лесное дело	51,70	62,5	100,0
35.03.03	Агрохимия и агропочвоведение	50,73	57,6	90,0
35.03.04	Агрономия	54,33	61,0	91,7
35.03.06	Агроинженерия	48,28	56,6	91,7
35.03.07	Технология производства и переработки с.-х. продукции	50,36	67,9	88,9
35.03.08	Водные биоресурсы	51,27	52,8	100,0

Рис. 5. Результаты прогнозирования с помощью модуля ЭИОС «Управление образовательными программами»

Образовательная программа	Средний балл	ρ_c	Среднее максимум	ρ_{max}	Среднее минимум	ρ_{min}	Максимум	Минимум		
35.03.06	44,20	0,55	56,00	0,0282	36,72	0,0344	67,00	0,00138	33,00	0,00418
38.03.02	51,84	0,537	55,00	0,316	43,27	0,145	67,00	0,0470	41,33	0,0862
36.05.01	56,98	0,531	78,05	0,0269	40,78	0,0293	82,33	0,0124	38,00	0,0108

Рис. 6. Результаты стохастического моделирования средних баллов ЕГЭ по трем выделенным образовательным программам

Доля успешно завершивших обучение. Для прогнозирования этого показателя использован следующий алгоритм.

Во-первых, рассчитывался коэффициент, успешно завершивших обучение:

$$l_{t+\tau} = \frac{\alpha_{t+\tau}}{\beta_t}, \quad (3)$$

где $l_{t+\tau}$ – коэффициент отношения успешно завершивших обучение по образовательной программе, $\alpha_{t+\tau}$ – численность выпускников, получивших образование, β_t – количество поступивших на обучение по образовательной программе, t – год поступления в вуз; τ – период обучения. При наличии филиала университета для оценки коэффициента отношения

успешно завершивших обучение по образовательной программе, применима формула, в которой $c_{t+\tau}$ и u_t – число выпускников и поступивших абитуриентов филиала вуза.

$$l_{t+\tau}^F = \frac{\alpha_{t+\tau} + c_{t+\tau}}{\beta_t + u_t} \quad (4)$$

Во-вторых, определяется средний коэффициент отношения успешно завершивших обучение по образовательной программе:

$$\bar{l}_{t+\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n l_{t+\tau}^i}{n}, \quad (5)$$

где $\bar{l}_{t+\tau}$ – усредненный коэффициент успешно завершивших обучение, n – многолетний период усреднения, i – номер года.

В-третьих, рассчитывается коэффициент отношения успешно завершивших обучение по образовательной программе, с учетом тенденций приема абитуриентов в соответствии с контрольными цифрами. Для этого предварительно строятся тренды, определяется начальная точка отсчета, соответствующая экстремуму – переходу от падения к росту или наоборот.

$$u'_{t+\tau} = \frac{\sum_{i=v}^n l_{t+\tau}^v}{n}, \quad (6)$$

где v – номер года, соответствующий экстремальному значению тенденции численности поступивших в вуз абитуриентов. Наиболее часто выделяемые тренды соответствуют параболической, степенной и линейной функциям.

В-четвертых, определяются прогностические значения числа выпускников по каждой образовательной программе для двух вариантов:

$$x_{t+\tau} = \bar{l}_{t+\tau} \beta_t, \quad (7)$$

$$x'_{t+\tau} = l'_{t+\tau} \beta_t, \quad (8)$$

где $x_{t+\tau}$, $x'_{t+\tau}$ – число выпускников при использовании среднего коэффициента успешно завершивших обучение и с учетом тенденций набора студентов на первый курс.

На рисунке 5 приведены прогностические значения доли успешно завершивших обучения студентов относительно приема на первый курс β_t , или $\beta_t + u_t$ (%).

Доля трудоустроившихся выпускников. Для прогнозирования этого показателя выполнялись следующие операции.

Проведена статистическая обработка данных о трудоустройстве выпускников 2019-2023 гг. Анализ данных с помощью корреляционного анализа и оценки статистических параметров и рядов трудоустройства по разным образовательным программам показывает, что временные ряды можно разделить на две группы – случайные и динамико-стохастические. Тренд наблюдается по трудоустройству выпускников направления 06.03.01 Биология и 35.03.01 Лесное дело. Прогноз этого показателя по выделенным образовательным программам основан на нелинейной модели в виде асимптотической функции по данным за 2017-2023 гг.:

$$z_t = 100,1 - 44,4e^{-0,311t}, \quad (9)$$

$$z_t = 100,1 - 42,9e^{-0,87t}, \quad (10)$$

где первое слагаемое представляет собой уровень насыщения, соответствующий 100 % с добавлением точности 0,1 %, t – номер года.

По большинству образовательных программ временные ряды изменяются случайным образом, поэтому целесообразно ориентироваться на среднее значение ряда.

$$\bar{z} = \frac{\sum_{t=1}^T z_t}{T}, \quad (11)$$

где \bar{z} – среднее значение доли трудоустроенных за период T ; z_t – доля трудоустроенных за каждый год; t – номер года трудоустройства.

Ввиду отсутствия в некоторые годы сведений по образовательным программам 35.03.08 Водные биоресурсы и аквакультура, 38.03.02 Менеджмент, 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям), использованы экспертные оценки.

Предложенные модели и алгоритмы прогнозирования доли успешно завершивших обучение, доли трудоустроившихся реализованы в модуле «Управление образовательными программами» электронной информационно-образовательной среды Иркутского ГАУ.

Оценка результатов прогнозирования. Результаты прогнозирования среднего балла ЕГЭ на основе (2) и экспертных оценок приведены в табл. 2. Для оценки качества прогноза показателей рассчитаны относительные погрешности ретроспективного прогноза на 2024 год. Прогноз осуществлялся для двух вариантов коэффициента экспертной оценки k . В первом случае $k=0,05$, а во втором – использован дифференцированный подход, связанный с особенностями направлений подготовки и специальностей ($k=0,06; 0,08; 0,10$). Чем конкурс выше, тем выше значение k .

Средняя погрешность прогноза среднего балла ЕГЭ по 20-ти образовательным программам составила 12,8 % при наибольшем значении 26,1 % для направления 35.03.01 Лесное дело. Средняя погрешность доли успешно завершивших обучение по рассматриваемым образовательным программам соответствует 18,8, а максимальная – 52,0 % по варианту с учетом тенденций числа поступающих. Аналогичные показатели равны 21,6 и 80,0 % при использовании усредненного коэффициента, успешно завершивших обучение. Максимальные расхождения фактических и аналитических данных получены для направлений 38.03.01 Экономика и 35.03.10 Ландшафтная архитектура.

Средняя погрешность доли трудоустроившихся выпускников по всем образовательным программам составила 6,7 %.

Максимальные отклонения аналитических значений от фактических имели место для направлений подготовки 38.05.01 Экономическая безопасность и 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям) – 15,4 %.

Большое значение для прогнозирования имеет точность прогнозов. Поскольку изменчивость показателей аккредитационного мониторинга для разных образовательных программ разная предлагается алгоритм оценки точности методики и прогноза на основе ретроспективной информации. Отметим, что прогноз связан со следующими факторами:

- требования, или нормативные значения показателей аккредитационного мониторинга;
- многолетняя изменчивость показателя;
- экспертная оценка на основе изменчивости показателя.

В общем случае для каждой образовательной программы необходимо определять точность прогноза или для групп образовательных программ. На основе анализа эмпирических данных предложено выделить три группы по среднему баллу ЕГЭ: с лучшими показателями по ранжированному списку, средними показателями и худшими показателями.

Для каждой группы предлагается использовать следующую формулу оценки точности прогноза:

$$\delta = \frac{k\sigma}{\bar{y}} \times 100\%, \quad (12)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение, \bar{y} – среднее значение ряда, k – коэффициент влияния на параметр точности прогностической модели.

Таблица 2. Расчет погрешности прогнозного значения среднего балла ЕГЭ на 2024 год согласно (2)

Код и направление подготовки	Факт	Прогноз для $k=0,05$	Прогноз для	Относительная погрешность прогноза для $k=0,05$	Относительная погрешность прогноза для $k=0,06; 0,08; 0,10$
06.03.01 Биология	52,2	51,0	52,13	2,2	0,1
09.03.03 Прикладная информатика	50,1	53,0	53,12	5,8	6,1
13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника	45,7	47,3	49,29	3,4	7,8
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	48,7	51,8	52,98	6,4	8,8
21.03.02 Землеустройство и кадастры	53,1	58,2	58,51	9,6	10,2
23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов	44,9	47,9	49,75	6,7	10,8
35.03.01 Лесное дело	41,0	49,7	51,70	21,2	26,1
35.03.03 Агрохимия и агропочвоведение	47,3	48,7	50,73	2,9	7,2
35.03.04 Агрономия	47,5	53,2	54,33	12,0	14,4
35.03.06 Агроинженерия	42,8	46,5	48,28	8,6	12,8
35.03.07 Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции	44,7	49,3	50,36	10,4	12,8
35.03.08 Водные биоресурсы и аквакультура	55,7	49,4	51,27	11,3	7,9
35.03.10 Ландшафтная архитектура	44,6	53,1	53,22	19,2	19,5
36.03.01 Ветеринарно-санитарная экспертиза	46,7	52,5	53,61	12,5	14,9
36.03.02 Зоотехния	44,0	50,9	53,00	15,7	20,5
36.05.01 Ветеринария	54,0	59,8	60,05	10,8	11,3
38.03.01 Экономика	49,0	58,1	58,30	18,6	19,0
38.03.02 Менеджмент	45,7	54,4	55,65	19,0	21,7
38.05.01 Экономическая безопасность	47,0	52,3	52,48	11,2	11,6
44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям)	нет набора	55,2	55,34	0,0	0,0
Среднее значение				10,9	12,8

Группе с лучшими показателями предлагается наиболее высокая точность, а группе с наихудшими показателями – самая низкая. Очевидно, что группа со средними показателями получает промежуточную точность.

В частности, для разных групп предложены следующие коэффициенты k ., полученные на основе соответствия эмпирических данных аналитическим значениям:

- 0,5 для группы лучших показателей;
- 1 для группы средних;
- 1,5 для группы худших.

Для учета мнений экспертов необходимо изменить формулу (12), добавив точность прогноза эксперта:

$$\delta = k_1 \frac{k\sigma}{\bar{y}} + k_2 \delta_1, \quad (13)$$

где k_1, k_2 – весовые коэффициенты (в первом приближении $k_1 = k_2 = 0,5$), δ_1 – точность прогноза эксперта.

Заключение. На основе методов статистической обработки и экспертных оценок разработаны алгоритмы для прогнозирования показателей аккредитационного мониторинга: среднего балла ЕГЭ, доли успешно завершивших обучение и доли трудоустроившихся выпускников, которые отображают специфику изменчивости систематизированных многолетних данных об этих показателях

Особенностью сбора, систематизации и пополнения данных является отлаженное взаимодействие ЭИОС с внутренними информационными системами ИС: Университет ПРОФ и ФИС ГИА и приема.

Для прогнозирования среднего балла ЕГЭ, в основном изменяющегося случайным образом, использовалась модель на основе среднего значения с управляемым коэффициентом роста, определяемым экспертными оценками для групп образовательных программ с разным уровнем качества подготовки абитуриентов. Для других показателей применялись методы, учитывающие как усредненные значения, так и тенденции изменения численности студентов.

На основе информационного обеспечения, разработанных моделей и алгоритмов создан модуль «Управление образовательными программами» в составе ЭИОС, для разработки которого использованы язык программирования PHP, JavaScript и серверы баз данных MySQL. Апробация модуля на многолетних данных образовательной деятельности Иркутского ГАУ показала его работоспособность и позволила оценить точность прогнозов. При этом в модуле реализована методика определения индикатора оценки точности прогнозов.

Разработанный модуль позволяет не только осуществлять мониторинг текущего состояния образовательных программ, но и прогнозировать их развитие, сравнивая полученные результаты с нормативными показателями для необходимой корректировки образовательной, профориентационной работы и мониторинга трудоустройства выпускников.

Перспективы исследований связаны с дальнейшим развитием моделей, адаптацией предложенных алгоритмов для оценки других показателей эффективности деятельности университета и использованием машинного обучения и нейронных сетей для решения управленческих задач.

Список источников

1. Новиков, А.М., Новиков Д.А. Как оценивать качество образования? Персональный сайт академика А.М. Новикова. – URL: http://www.anovikov.ru/artikle/kacth_obr.htm (дата обращения 03.05.2025).
2. Абанкина И.В. Оценка результативности университетов с помощью оболочечного анализа данных / И.В. Абанкина, Ф.Т. Алескеров, В.Ю. Белоусова и др. // Вопросы образования, 2013. – № 2. – С. 15–48. DOI:10.17323/1814-9545-2013-2-15-48.
3. Зинченко, Д.И. Моделирование эффективности российских университетов / Д. И. Зинченко, А. А. Егоров // Экономический журнал Высшей школы экономики, 2019. – Т. 23, № 1. – С. 143–172. DOI 1813-8691-2019-23-1-143-172.
4. Садовничий, В.А. Московский международный рейтинг «Три миссии университета» как инструмент оценки качества высшего образования // В.А. Садовничий // Высшее образование сегодня, 2019. – № 4. – С. 2-9.
5. Лавриненко Я.Б. Анализ инновационных университетов рейтинга «Интерфакс» / Я.Б. Лавриненко // Креативная экономика, 2023. – Т. 17. № 10. – С. 3893-3916.
6. Антюхова Е.А. Рейтинги университетов в глобальном образовательном пространстве / Е.А. Антюхова // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 4: История. Регионоведение. Международные отношения, 2020. – Т. 25. № 2. – С. 253-267.
7. Сун Юй. Рейтинг университета как компонент PR-стратегии продвижения на рынке образовательных услуг / Юй Сун. // Мир науки, культуры, образования, 2021. – № 1 (86). – С. 346-349.
8. Киселева О.М., Тимофеева Н.М., Быков А.А. Формализация элементов образовательного процесса на основе математических методов // Современные проблемы науки и образования, 2013. – № 1. – С. 224.

9. Николаева Д.Р. Метод математического моделирования процесса оценивания профессиональных компетенций выпускников ВУЗа / В.Э. Борзых, Т.Н. Шалкина, Д.Р. Николаева. – Электрон. журн. // Современные проблемы науки и образования, 2015. – № 1. URL: <http://www.science-education.ru/121-17882> (дата обращения 16.06.2025).
10. Зубкова Т.М. Оценка рейтинга научно-педагогических работников университета на основе автоматизированной информационной системы / Т.М. Зубкова, Е.Н. Наточая // Программные продукты и системы, 2019. – № 3. – С. 525-533.
11. Климов Е.С. О моделях и алгоритмах машинного обучения в управлении аграрным производством / Е.С. Климов, Я.М. Иванько // В сборнике: Научно-исследовательская деятельность аспирантов в решении приоритетных задач развития агропромышленного комплекса. Материалы научно-практической конференции, посвященной 70-летию аспирантуры Иркутского ГАУ. п. Молодежный, 2023. – С. 240-244.
12. Фатхуллин Р.Р. Обоснование инвариантности решений, основанных на образовательной квалиметрии и теории нейронных сетей при оценке качества деятельности образовательных организаций // Вестник Кибернетика и программирование, 2014. – № 6. – С. 33–73. – DOI: 10.7256/2306-4196.2014.6.13477. – URL: http://e-notabene.ru/kp/article_13477.html (дата обращения 18.05.2025).
13. Баймаков А.А. Электронно-информационная образовательная среда и прогнозирование деятельности университета / А.А. Баймаков, Я.М. Иванько, Н.И. Федурин // В сборнике: Цифровые технологии и математическое моделирование в науке, образовании и производстве. Материалы Всероссийской научно-практической конференции для преподавателей и научных сотрудников. Иркутск, 2024. – С. 165-173.
14. Баймаков А.А. Электронная информационно-образовательная среда университета: возможности и перспективы развития / А.А. Баймаков, Я.М. Иванько // В сборнике: Научные исследования и разработки к внедрению в АПК. Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых. п. Молодежный, 2023. – С. 486-491.
15. Баймаков А.А. Перспективы цифровой трансформации аграрного университета / А.А. Баймаков, А.О. Замараев, Я.М. Иванько и др. // В сборнике: Цифровые технологии в образовании, науке и сельском хозяйстве. Материалы национального форума с международным участием. Молодежный, 2023. – С. 3-10.
16. Крицкий С.Н. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель. – М.: Наука, 1982. – 271 с.

Баймаков Александр Александрович. Аспирант, руководитель отдела информационных разработок центра информационных технологий Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. AuthorID 986990, SPIN: 8062-8930, ORCID: 0009-0002-2082-6902, web@igsha.ru. 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный.

Иванько Ярослав Михайлович. Доктор технических наук, профессор кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. AuthorID: 106394, SPIN: 9654-8057, ORCID: 0000-0003-4118-7185. 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный.

Федурин Нина Ивановна. Кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и математического моделирования, руководитель центра управления качеством образования Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. AuthorID 460753, SPIN: 9556-2188, ORCID: 0000-0002-8714-6859, fedurina_n@mail.ru. 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный.

UDC 004.414.23:378.14

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.012

Modeling the effectiveness of university activities using an electronic information and educational environment

Aleksandr A. Baymakov, Yaroslav M. Ivanyo, Nina I. Fedurina

Irkutsk state agrarian university named after A.A. Ezhevsky,

Russia, Molodezhny settlement, Irkutsk district, Irkutsk region, web@igsha.ru

Abstract. This article presents the results of a study aimed at developing an "Educational Program Management" module as part of the university's electronic information and educational environment (EIEE). The module's mathematical and algorithmic support enables forecasting accreditation monitoring indicators, thereby improving

the quality of educational management. The study is based on an analysis of long-term data from 20 educational programs at Irkutsk State Agrarian University. The scientific novelty of this work lies in the systematization of data collection, storage, and processing processes, as well as the development of specialized forecasting algorithms adapted to the specific statistical parameters of monitoring indicator time series. Unlike existing developments, the proposed algorithms are implemented as a practical tool integrated into the university's EIEE. To forecast indicators such as the average Unified State Exam score, the percentage of successful completions, and the percentage of employed graduates, a combination of methods was used, including correlation and regression analysis, expert assessment methods, and probabilistic modeling based on a three-parameter gamma distribution. It is proposed to differentiate the accuracy of forecast assessments based on the level of preparation of applicants. The developed module was tested on real data, and the forecast accuracy was assessed. A retrospective forecast of key accreditation indicators was performed, the values of which were compared with actual data. The average relative forecast error was 12.8% for the average Unified State Exam score, 18.8% for the percentage of successful completions, and 6.7% for the percentage of employed graduates. The obtained results demonstrate the practical applicability of the module for the early assessment of educational programs' compliance with accreditation requirements and the formation of informed management decisions.

Keywords: accreditation, monitoring, educational program, electronic information educational environment, modeling, management

References

1. Novikov, A.M., Novikov D.A. Kak ocenivat' kachestvo obrazovaniya? Personal'nyj sajt akademika A.M. Novikova [How to assess the quality of education? Personal website of academician A.M. Novikov], available at: http://www.anovikov.ru/artikle/kach_obr.htm (accessed 03/05/2025).
2. Abankina I.V., Aleskerov F.T., Abankina I.V., Belousova V.YU. et al. Ocenka rezul'tativnosti universitetov s pomoshch'yu obolochecnogo analiza dannyh [Evaluation of the performance of universities using shell data analysis]. *Voprosy obrazovaniya [Educational studies]*. 2013, no 2, pp. 15-48, DOI:10.17323/1814-9545-2013-2-15-48.
3. Zinchenko D.I., Egorov A.A. Modelirovanie effektivnosti rossijskikh universitetov [Modeling the efficiency of Russian universities]. *Ekonomicheskij zhurnal Vysshey shkoly ekonomiki [HSE Economic Journal]*. 2019, vol. 23, no 1, pp. 143-172, DOI 1813-8691-2019-23-1-143-172.
4. Sadovnichij, V.A. Moskovskij mezhdunarodnyj rejting «Tri missii universiteta» kak instrument ocenki kachestva vysshego obrazovaniya [Moscow international ranking "Three university missions" as a tool for assessing the quality of higher education]. *Vyssheye obrazovaniye segodnya [Higher education today]*, 2019, no 4, pp. 2-9.
5. Lavrinenko, YA.B. Analiz innovacionnyh universitetov rejtinga «Interfaks» [Analysis of innovative universities in the Interfax rating]. *Kreativnaya ekonomika [Creative Economics]*, 2023, vol. 17, no 10, pp. 3893-3916.
6. Antyuhova E.A. Rejtingi universitetov v global'nom obrazovatel'nom prostranstve [University rankings in the global educational space]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Istoriya. Regionovedeniye. Mezhdunarodnyye otnosheniya [Bulletin of Volgograd state university. Series 4: History. Regional Studies. International Relations]*, 2020, vol. 25, no 2, pp. 253-267.
7. Sun YUj. Rejting universiteta kak komponent PR-strategii prodvizheniya na rynke obrazovatel'nyh uslug [University ranking as a component of a PR strategy for promoting in the educational services market]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya [World of Science, Culture, Education]*, 2021, no 1 (86), pp. 346-349.
8. Kiseleva O.M., Timofeeva N.M., Bykov A.A. Formalizaciya elementov obrazovatel'nogo processa na osnove matematicheskikh metodov [Formalization of elements of the educational process based on mathematical methods]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]*, 2013, no 1, pp. 224.
9. Nikolaeva D.R., SHalkina T.N., Borzyh V.E. Metod matematicheskogo modelirovaniya processa ocenivaniya professional'nyh kompetencij vypusnikov VUZa [Method of mathematical modeling of the process of assessing professional competencies of university graduates]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]*, 2015, no 1, available at: <http://www.science-education.ru/121-17882> (accessed 16/06/2025).
10. Zubkova T.M., Natochaya E.N. Ocenka rejtinga nauchno-pedagogicheskikh rabotnikov universiteta na osnove avtomatizirovannoj informacionnoj sistemy [Evaluation of the rating of scientific and pedagogical workers of the university based on the automated information system] *Programmnyye produkty i sistemy [Software & systems]*, 2019, no 3, pp. 525-533.
11. Klimov E.S., Ivan'o YA.M. O modelyah i algoritmah mashinnogo obucheniya v upravlenii agrarnym proizvodstvom [On models and algorithms of machine learning in the management of agricultural production]. *Nauchno-issledovatel'skaya deyatel'nost' aspirantov v reshenii prioritnykh zadach razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Research Activities of*

- Postgraduates in Solving Priority Problems of Agro-Industrial Complex Development: Proceedings of the Scientific and Practical Conference]. Molodezhny, 2023, pp. 240-244.
12. Fathullin R.R. Obosnovanie invariantnosti reshenij, osnovannyh na obrazovatel'noj kvalimetrii i teorii nejronnyh setej pri ocenke kachestva deyatel'nosti obrazovatel'nyh organizacij [Justification of the invariance of solutions based on educational qualimetry and the theory of neural networks in assessing the quality of activities of educational organizations]. NB: Kibernetika i programmirovaniye [NB: Cybernetics and Programming], 2014, no 6, pp. 33–73, DOI: 10.7256/2306-4196.2014.6.13477, available at: http://e-notabene.ru/kp/article_13477.html (accessed 18/05/2025).
 13. Bajmakov A.A., Ivan'o YA.M., Fedurina N.I. Elektronno-informacionnaya obrazovatel'naya sreda i prognozirovaniye deyatel'nosti universiteta [Electronic information educational environment and forecasting of university activities]. Tsifrovyye tekhnologii i matematicheskoye modelirovaniye v nauke, obrazovanii i proizvodstve: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Digital technologies and mathematical modeling in science, education and production: proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Irkutsk, 2024, pp. 165-173.
 14. Bajmakov A.A. Ivan'o YA.M. Elektronnaya informacionno-obrazovatel'naya sreda universiteta: vozmozhnosti i perspektivy razvitiya [Electronic information and educational environment of the university: opportunities and development prospects]. Nauchnyye issledovaniya i razrabotki k vnedreniyu v APK: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh [Scientific research and development for implementation in agro-industrial complex: proceedings of the international scientific and practical conference of young scientists]. Molodezhny, 2023, pp. 486-491.
 15. Bajmakov A.A., Zamaraev A.O., Ivan'o YA.M., Fedurina N.I. Perspektivy cifrovoj transformacii agrarnogo universiteta [Prospects for digital transformation of the agricultural university]. Tsifrovyye tekhnologii v obrazovanii, nauke i sel'skom khozyaystve: materialy natsional'nogo foruma s mezhdunarodnym uchastiyem [Digital technologies in education, science and agriculture: proceedings of the national forum with international participation]. Molodezhny, 2023, pp. 3-10.
 16. Kritskiy S.N., Menkel M.F. Gidrologicheskiye osnovy upravleniya vodokhozyaystvennymi sistemami [Hydrological Foundations of Water Management Systems Management]. Moscow, Nauka [Science] Publ., 1982, 271 p.

Bajmakov Aleksandr Aleksandrovich. Postgraduate student, Head of the Information Development Department of the Information Technology Center of the Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky. AuthorID 986990, SPIN: 8062-8930, ORCID 0009-0002-2082-6902, web@igsha.ru. 664038, Russia, Irkutsk Region, Irkutsk District, Molodezhny settlement.

Ivano Yaroslav Mikhailovich. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Informatics and Mathematical Modeling of the Institute of Economics, Management and Applied Informatics of the Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky. AuthorID: 106394, SPIN: 9654-8057, ORCID: 0000-0003-4118-7185. 664038, Russia, Irkutsk Region, Irkutsk District, Molodezhny settlement.

Fedurina Nina Ivanovna. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Science and Mathematical Modeling, Head of the Education Quality Management Center of the Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky. AuthorID: 460753, SPIN: 9556-2188, ORCID: 0000-0002-8714-6859, fedurina_n@mail.ru. 664038, Russia, Irkutsk Region, Irkutsk District, Molodezhny settlement.

Статья поступила в редакцию 04.07.2025; одобрена после рецензирования 18.11.2025; принята к публикации 24.02.2026.

The article was submitted 07/04/2025; approved after reviewing 11/18/2025; accepted for publication 02/24/2026.

Программные системы и комплексы

УДК 519.233.5

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.013

О программной реализации метода Монте-Карло для оценивания доверительных полос линейной регрессии

Степанов Александр Владимирович

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ), Россия, Санкт-Петербург, stepanov17@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается задача расчета полос неопределенности линейной регрессии с коррелированными исходными данными. Для оценивания доверительных полос применяется обобщенный метод наименьших квадратов, при этом для оценивания их границ вводится коэффициент охвата, который, будучи умноженным на стандартную неопределенность регрессии в рассматриваемых точках, дает указанные границы. Актуальность исследования определяется тем, что стандартные методы построения доверительных интервалов, основанные на предположении о независимости ошибок, при наличии автокорреляции приводят к систематическому занижению ширины полос неопределенности. Это, в свою очередь, создает ложное впечатление о точности прогнозов и может служить причиной ошибочных статистических выводов. Для корректного построения доверительных полос необходимо учитывать структуру временной зависимости ошибок. В работе рассматриваются следующие модели коррелированных шумов: авторегрессионные процессы с экспоненциальным затуханием корреляции, а также цветные шумы, характеризующиеся степенным затуханием и долговременной памятью.

В отличие от классического случая независимых ошибок, где коэффициент охвата соответствует квантили нормального распределения, при наличии корреляции его аналитическое выражение отсутствует. Значение коэффициента напрямую зависит от структуры ковариационной матрицы ошибок, объема обучающей выборки и горизонта прогнозирования. Для его определения в работе применяется численный метод Монте-Карло в сочетании с итерационной процедурой бисекции, позволяющий находить коэффициент охвата с заданной точностью.

Разработано специализированное программное обеспечение на языке Python с использованием библиотек NumPy и SciPy. Программная реализация решает задачу оценивания полосы линейной регрессии гиперболической формы, когда корреляционная структура ошибок описывается вышеупомянутыми моделями. Приведены соответствующие примеры оценивания упомянутого коэффициента охвата и полос регрессии, дана ссылка на программную реализацию. Модульная архитектура разработанной программы допускает расширение на другие типы корреляционных структур. Применимость работы обусловлена необходимостью обеспечения корректной оценки неопределенности при статистической обработке экспериментальных данных, получаемых при решении измерительных задач.

Ключевые слова: линейная регрессия, доверительные полосы, обобщенный метод наименьших квадратов, коррелированный шум, цветной шум, метод Монте-Карло, численные методы

Цитирование: Степанов А.В. О программной реализации метода Монте-Карло для оценивания доверительных полос линейной регрессии / А.В. Степанов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 180-188 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.013.

Введение. Оценивание доверительных полос линейной регрессии представляет собой фундаментальную задачу статистического анализа, особенно актуальную в условиях наличия коррелированных ошибок (под ошибками в данном контексте будем понимать разность между наблюдаемыми значениями и значениями, предсказанными рассматриваемой моделью). Пренебрежение учетом корреляционной структуры ошибок приводит к серьезному искажению статистических выводов и прогнозов, а именно, к систематической недооценке ширины доверительных полос, что создает ложное впечатление о точности оценок (прогнозов) [1, 2]. Стандартные методы, предполагающие независимость ошибок, могут существенно занижать реальную неопределенность даже при умеренной автокорреляции, что может нести серьезные негативные последствия при решении конкретных технических и научных задач (некорректной калибровке оборудования, ложным выводам о соответствии заявленным требованиям, и

т. д.). Разработка методов построения доверительных полос регрессии в случае коррелированных данных остается актуальной задачей, требующей сочетания теоретических подходов и вычислительных алгоритмов. Необходимость применения численных методов (в данном случае, метода Монте-Карло) обусловлена, в частности, отсутствием универсального аналитического решения в общем случае и ограниченностью объема выборок (что делает нецелесообразным применение асимптотических методов).

Целью представляемой работы являлась разработка программного обеспечения для оценивания доверительных полос линейной регрессии в рамках подхода, предложенного в работах [3, 4].

Для оценивания доверительных полос применяется обобщенный метод наименьших квадратов, при этом для оценивания их границ вводится коэффициент охвата, который, будучи умноженным на стандартную неопределенность регрессии в рассматриваемых точках, дает указанные границы. Программная реализация, предлагаемая в этой работе, решает задачу оценивания полосы линейной регрессии, когда корреляционная структура ошибок описывается авторегрессионными моделями (AR-моделями) [2, 5, 6] или цветными шумами [7, 8]. Обе эти модели активно используются при описании временных рядов при решении различных научных и технических задач, при наличии взаимосвязи между последующими значениями. Авторегрессионные модели адекватно отражают краткосрочные зависимости, характерные для технических измерений. Цветные шумы, такие, как, например, розовый ($1/f$) и красный ($1/f^2$), могут более точно описывать долгосрочные корреляции (в физических экспериментах, геофизических процессах и т.д.). Следует отметить различие в характере затухания корреляции для рассматриваемых моделей: AR-модели предполагают экспоненциальное затухание, в то время как цветные шумы демонстрируют степенное затухание автокорреляционной функции.

1. Оценивание полосы регрессии. Рассмотрим задачу построения доверительной полосы (коридора) неопределённости при оценивании парной регрессии:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon(X), \quad (1)$$

при наличии экспериментальных данных $\{(x_i, y_i)\}$, $0 \leq i < N$. Величина X , в частности, может представлять собой время (т.е. x_i – моменты измерений), тогда уравнение (1) описывает линейный во времени дрейф. Далее для простоты будем считать, что значения x_i являются равноотстоящими, $x_i = ih$, $h > 0$. Значения x_i считаются измеренными точно, шум ε – в общем случае, коррелированным: $cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) \neq 0$, $i \neq j$, $Var(\varepsilon_i) = \sigma^2$. Ниже рассмотрим вопрос о влиянии вида шума на оценку доверительной полосы регрессии, а также предложим способ ее оценивания.

Следуя [3, 4], будем считать, что доверительная полоса (для уровня вероятности P_0) в каждой точке представляет собой произведение коэффициента K и соответствующей стандартной неопределённости регрессии в заданной точке:

$$Band = \{(x, y): 0 \leq x < (N - 1)h, |y - \hat{y}(x)| \leq Ku(\hat{y}(x))\}, \quad (2)$$

где

$$\hat{y}(x) = \beta_0 + \beta_1 x$$

– оценка регрессии, полученная по данным на интервале $x \in [0, (N_0 - 1)h]$, а коэффициент K подбирается из соображения, чтобы полоса регрессии, экстраполированная на интервал $[0, (N - 1)h]$, покрывала «истинный» тренд $y = \beta_0 + \beta_1 x$ с заданной вероятностью P_0 . Следуя сложившейся в метрологической практике традиции, коэффициент K будем называть коэффициентом охвата. Данный термин отражает его функцию: K представляет собой безразмерный коэффициент, который при умножении на стандартную неопределенность определяет интервал, охватывающий истинное значение измеряемой (прогнозируемой) величины с заданной

вероятностью, масштабируя оценку неопределенности до требуемого уровня доверия. Коэффициент K будет оцениваться ниже методом Монте-Карло, при этом, очевидно, помимо P_0 , он будет зависеть как от модели шума ε , так и от значений N_0, N .

Оценки $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$ получим с помощью обобщенного метода наименьших квадратов (ОМНК):

$$\hat{\beta} = \begin{pmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \end{pmatrix} = \Theta A' V^{-1} \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_{N_0} \end{pmatrix}, \quad \Theta = (A' V^{-1} A)^{-1}, \quad A' = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & h & \dots & (N_0 - 1)h \end{pmatrix},$$

где V – ковариационная матрица шума (штрихом обозначена операция транспонирования матрицы). Стандартная неопределенность оценки $\hat{y}(x)$ имеет вид:

$$u(x) = u(\hat{y}(x)) = \sigma \sqrt{\theta_{1,1} + 2\theta_{1,2}x + \theta_{2,2}x^2}. \quad (3)$$

При получении коэффициента охвата методом Монте-Карло в качестве модельного рассмотрим нулевой тренд ($\beta_0 = \beta_1 = 0$). В этом случае для того, чтобы доверительная полоса покрывала весь дрейф на отрезке экстраполяции $[0, (N - 1)h]$, достаточно, чтобы выполнялось неравенство $|\hat{y}(x)| \leq Ku(x)$. Таким образом, для нахождения коэффициента K методом Монте-Карло достаточно на каждой его итерации сгенерировать шум, в соответствии с выбранной моделью, и вычислить отношение

$$M = \max_x \frac{|\hat{y}(x)|}{u(x)}.$$

Далее, рассматривая совокупность значений M , как эмпирическое распределение, коэффициент K следует выбрать, как квантиль уровня P_0 этого распределения, т. е. такое значение, что доля симуляций с $M \leq K$ равна P_0 .

Имея вычисленный коэффициент K , доверительную полосу можно оценить с помощью формул (2), (3). Подчеркнем еще раз, что отсутствие замкнутой аналитической формулы для коэффициента охвата (аналитического выражения для квантилей распределения максимума M) при произвольной корреляционной структуре шума и ограниченности объема выборки делает метод Монте-Карло практически единственным универсальным обоснованным подходом к решению данной задачи.

2. Реализованные модели коррелированных шумов. Опишем используемые модели коррелированного шума ε .

2.1. Авторегрессионные модели шумов. Рассмотрим автокорреляционные модели шумов AR(1):

$$\varepsilon_k = \varphi \varepsilon_{k-1} + w_k, \quad (4)$$

и AR(2):

$$\varepsilon_k = \varphi_1 \varepsilon_{k-1} + \varphi_2 \varepsilon_{k-2} + w_k, \quad (5)$$

где w_k – белый шум (может быть как Гауссовым, так и нет), с дисперсией σ_w^2 . Ковариационные матрицы имеют следующий вид. Для (4):

$$V = \frac{\sigma_w^2}{1-\varphi^2} \begin{pmatrix} 1 & \varphi & \dots & \varphi^{N_0-2} & \varphi^{N_0-1} \\ \varphi & 1 & \dots & \varphi^{N_0-3} & \varphi^{N_0-2} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots \\ \varphi^{N_0-2} & \varphi^{N_0-1} & \dots & \varphi & 1 \end{pmatrix};$$

для (5):

$$V = \sigma^2 \begin{pmatrix} \rho_0 & \rho_1 & \rho_2 & \dots & \rho_{N_0-1} \\ \rho_1 & \rho_0 & \rho_1 & \dots & \rho_{N_0-2} \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \rho_{N_0-1} & \rho_{N_0-2} & \rho_{N_0-3} & \dots & \rho_0 \end{pmatrix},$$

где значения ρ_i автокорреляционной функции вычисляются по формулам: $\rho_0 \equiv 1$, $\rho_1 = \frac{\varphi_1}{1-\varphi_2}$, $\rho_i = \varphi_1\rho_{i-1} + \varphi_2\rho_{i-2}$, $i \geq 2$. Дисперсию σ^2 процесса AR(2) получаем решением уравнений Юла-Уокера (в случае модели AR(2) она имеет порядок, равный трем):

$$\begin{aligned}\gamma_0 &= \varphi_1\gamma_1 + \varphi_2\gamma_2 + \sigma_w^2, \\ \gamma_1 &= \varphi_1\gamma_0 + \varphi_2\gamma_1, \\ \gamma_2 &= \varphi_1\gamma_1 + \varphi_2\gamma_0,\end{aligned}$$

где $\gamma_i = cov(\varepsilon_k, \varepsilon_{k-i})$ представляет собой автоковариацию с лагом i (соответственно, дисперсию σ^2 для $i = 0$: $\sigma^2 = \gamma_0$). Для получения i -го уравнения данной системы следует умножить исходную модель на ε_{k-i} и взять математическое ожидание.

Заметим, что условия стационарности AR-процесса имеют вид: $|\varphi| < 1$ для AR(1) и $\varphi_2 \pm \varphi_1 < 1$, $|\varphi_2| < 1$ для AR(2).

2.2. Цветные шумы. Цветные шумы с заданной спектральной мощностью (PSD) плотности $1/f^a$ генерируются спектральным методом:

- генерируется спектр шума (случайные фазы с амплитудой \sqrt{PSD});
- обратным преобразованием Фурье получается временной ряд;
- выполняется масштабирование до целевого уровня дисперсии.

Помимо параметра α логарифмического наклона спектра и целевой дисперсии шума, при задании модели также задаются частота дискретизации f_s и минимальная частота f_{min} . Автокорреляционная функция и дисперсия оцениваются по сгенерированной выборке цветного шума большой длины. Также предусмотрена генерация смеси белого и цветного шума с заданными весами (включая нормализацию до единичного уровня дисперсии); подобная модель ранее рассматривалась в работе [9].

3. Архитектура программы. Код программы и примеры использования доступны по ссылке [10]. Программа написана на языке программирования Python (версия 3.12), с использованием библиотеки NumPy, и построена по модульному принципу с использованием объектно-ориентированного подхода. Перечислим основные ее компоненты:

1. Интерфейсы: абстрактные классы для генераторов шума и калькуляторов корреляционной матрицы (заметим, что последняя в целях оптимизации используется на всех итерациях метода Монте-Карло).
2. Реализации AR-моделей – классы для генерации AR(1) и AR(2) процессов.
3. Реализации цветных шумов – классы генерации шумов, спектральная плотность мощности которых описывается законом $S(f) \sim 1/f^\alpha$.
4. Реализации смесей шумов – классы для генерации комбинаций белого и цветного шумов.
5. Вычислительный модуль – функции для оценивания регрессии, вычисления соответствующей неопределенности и коэффициента K , а также получения оценки границ доверительной полосы регрессии при заданной выборке y_i по формулам (2), (3).
6. Программа также содержит ряд примеров оценивания доверительных полос регрессии ([10], файл examples.py), реализована утилита для их визуализации.

Абстрактные классы, подлежащие наследованию, имеют вид:

Листинг 1. Абстрактные классы генератора шума и калькулятор корреляционной матрицы / дисперсии шума

```
class NoiseGenerator(ABC):
    @abstractmethod
    def generate(self, n: int) -> np.ndarray:
        """Генерирует шум заданной длины"""

class CovarianceCalculator(ABC):
    @abstractmethod
```

```
def compute_correlation_matrix(self, n: int) -> np.ndarray:
    """Вычисляет корреляционную матрицу"""

    @abstractmethod
    def get_variance(self) -> float:
        """Возвращает дисперсию шума"""
```

Конкретные реализации генераторов шума и калькуляторов корреляционной матрицы реализованы для всех перечисленных моделей (соответствующие имена классов: <модель_шума>NoiseGenerator, <модель_шума>CovarianceCalculator, где <модель_шума> – одна из AR1, AR2, ColoredNoise, MixedNoise). Помимо указанных классов, реализованы три общих функции: для вычисления стандартной неопределенности $u(x)$, коэффициента K (ее сигнатура приведена в Листинге 2 ниже), и оценивания доверительной полосы регрессии (подробности реализации (листинг) функции опущены; в коде может быть найдена по имени estimate_confidence_band)

Листинг 2. Функция вычисления коэффициента K

```
def compute_k(n0: int, # N0
             n: int, # N
             h: float,
             noise_generator: NoiseGenerator,
             cov_calculator: CovarianceCalculator,
             rho: float = 0.95,
             n_sim: int = 1000000,
             k_low: float = 1.5, # нижняя граница K
             k_high: float = 4., # верхняя граница K
             k_tol: float=1e-4) # точность определения K
    """Вычисляет коэффициент K методом Монте-Карло и бисекции"""
    ...
```

Заметим, что функция принимает абстрактные генератор шума и калькулятор корреляционной матрицы в качестве аргументов, что делает библиотеку легко расширяемой относительно новых моделей шумов. В случае необходимости границы k_low и k_high отрезка, на котором производится поиск значения K методом бисекции, подстраиваются автоматически (пользователь получает соответствующее предупреждение). Массив значений неопределенности будет распечатан, в случае установки флага print_u.

4. Примеры использования программы. Приведем примеры использования программы для получения значений коэффициента K .

Листинг 3. Примеры вычисления коэффициента K

```
n0, n = 20, 50
h = 1

# Пример 1: AR(1) с нормальным белым шумом
phi = 0.7
sigma_w = 1.0
noise_generator_ar1 = AR1NoiseGenerator(phi, sigma_w)
cov_calculator_ar1 = AR1CovarianceCalculator(phi, sigma_w)
k_ar1 = compute_k(n0, n, h, noise_generator_ar1, cov_calculator_ar1)
print(f"K = {k_ar1:.2f}") # результат: K = 2.44

# Пример 2: AR(1) с белым шумом, описываемым симметричным TSP-распределением
for p_tsp in [0.5, 1, 10]: # параметр формы TSP-распределения
    ar1_tsp_noise = AR1NoiseGenerator(phi, sigma_w,
                                     white_noise_func=lambda size: tsp_white_noise(size, p))
    k_ar1_tsp = compute_k(n0, n, h, noise_generator=ar1_tsp_noise,
```

```

cov_calculator=cov_calculator_ar1)
print(f"K = {k_ar1_tsp:.2f}") # результат: K = 2.40, K = 2.41, K = 2.70

# Пример 3: AR(2) с нормальным белым шумом
phi1, phi2 = 0.5, -0.3
noise_generator_ar2 = AR2NoiseGenerator(phi1, phi2, sigma_w)
cov_calculator_ar2 = AR2CovarianceCalculator(phi1, phi2, sigma_w)
k_ar2 = compute_k(n0, n, h, noise_generator_ar2, cov_calculator_ar2)
print(f"K = {k_ar2:.2f}") # результат: K = 2.44

# Пример 4: Цветной шум (1/f^a)
colored_noise_gen = ColoredNoiseGenerator(
    a=1., scale=1., fs=1., target_std=1., f_min=0.01)
colored_noise_cov = ColoredNoiseCovarianceCalculator(
    a=1., scale=1., fs=1., target_std=1., f_min=0.01, simulation_length=100000)
k_colored = compute_k(n0, n, h, noise_generator=colored_noise_gen,
    cov_calculator=colored_noise_cov)
print(f"K = {k_colored:.2f}") # результат: K = 2.95

# Пример 5: Комбинация белого и цветного шума
white_weight = 0.7
white_sigma = 1.0
colored_a = 1.0 # 1/f

mixed_noise_gen = MixedNoiseGenerator(white_weight, white_sigma, colored_a,
    colored_scale=1., colored_fs=1., colored_target_std=1., colored_f_min=0.01)
mixed_noise_cov = MixedNoiseCovarianceCalculator(white_weight, white_sigma,
    colored_a, colored_scale=1., colored_fs=1., colored_target_std=1.,
    colored_f_min=0.01, simulation_length=100000)
k_mixed = compute_k(n0, n, h,
    noise_generator=mixed_noise_gen, cov_calculator=mixed_noise_cov)
print(f"K = {k_mixed:.2f}") # результат: K = 2.83

```

Значения K , вычисленные с помощью программы, содержатся в комментариях («результат: $K = \dots$ »). Программа также дает возможность при генерации белого шума использовать законы распределений, отличные от нормального: в Примере 2 Листинга 3 белый шум описывается симметричным двусторонним степенным распределением [11] (такой пример для шума, описываемого моделью AR(1), рассматривался ранее в работе [4]).

По ссылке [10] также можно найти примеры вычисления доверительных полос регрессии. Приведем один из них ниже (заметим, что вид полосы в каждом конкретном примере, очевидно, зависит от конкретных значений y_i).

Пример: пусть $n_0 = 20$, $n = 100$, шум описывается моделью AR(1) с $\varphi = 0.5$, белый шум имеет симметричное двустороннее степенное распределение с параметром степени $p = 10$ и единичной дисперсией. Тогда $K \approx 2.47$, и доверительная полоса для $P_0 = 0.95$ и конкретной реализации y_i приведена ниже на рисунке 1.

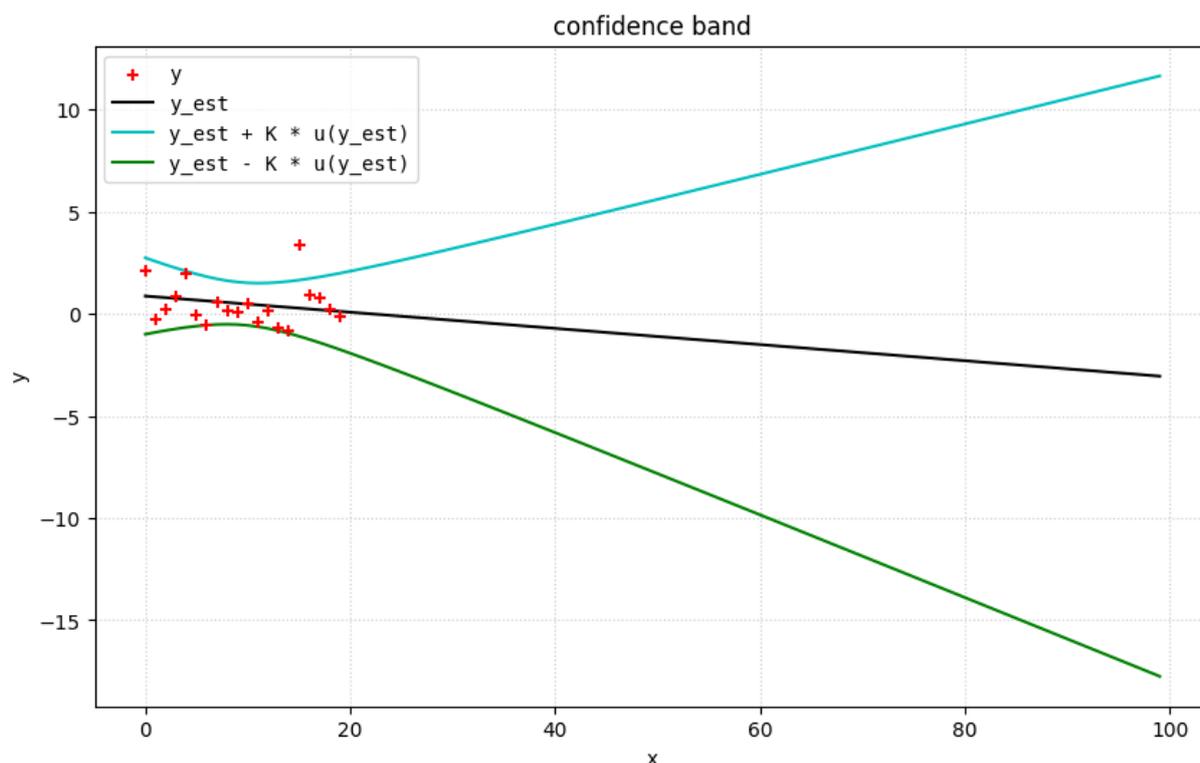


Рис. 1. Пример построенной доверительной полосы регрессии

Заметим, что использование библиотеки NumPy при написании Программы дает следующие преимущества: векторизация операций и использование оптимизированных матричных операций. Современные реализации NumPy, как правило, используют оптимизированные библиотеки линейной алгебры, которые, в свою очередь, автоматически распараллеливают выполнение многих стандартных операций (таких, как умножение матриц, разложения, некоторые поэлементные операции) на уровне потоков без прямого участия пользователя. Это позволяет добиться высокой производительности вычислений, сравнимой с таковой для низкоуровневых языков программирования.

Заключение. В статье рассмотрена задача оценивания доверительных полос линейной регрессии в условиях коррелированных ошибок, описываемых AR-моделями и цветными шумами. Стандартные методы построения доверительных интервалов, основанные на предположении о независимости и нормальности ошибок, приводят к систематическому занижению ширины полос и, как следствие, к недооценке реальной неопределенности прогноза. Установлена принципиальная необходимость применения численных методов, в частности, метода Монте-Карло в сочетании с алгоритмом бисекции, для определения коэффициента охвата K , обеспечивающего заданный уровень доверия, аналитическое вычисление которого невозможно из-за сложной зависимости от структуры ковариационной матрицы, параметров регрессии и объема данных. Предложенный алгоритм позволяет находить значения K с заданной точностью при разумных вычислительных затратах. Заметим, что критически важное значение при этом имеет корректный выбор модели шума, определяемый природой исследуемых данных.

Разработанное программное обеспечение допускает дальнейшее расширение и адаптацию к конкретным прикладным задачам. Архитектура позволяет относительно просто добавлять как новые типы корреляционных структур, так и распределения ошибок. В качестве одного из дальнейших направлений для разработки можно упомянуть расширение на нелинейные регрессионные модели.

Список источников

1. Lee J., Lund R. Revisiting Simple Linear Regression with Autocorrelated Errors. *Biometrika*, 2004, 91(1), pp. 240–245, DOI:10.1093/biomet/91.1.240.
2. Safi S., White A. The Efficiency of OLS in the presence of auto-correlated disturbances in regression models. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 2006, 5(1), pp. 133-143, DOI:10.22237/jmasm/1146456540.
3. Степанов А.В. Оценивание доверительных полос для линейной регрессии при коррелированных входных данных / Степанов А.В., Чуновкина А.Г. // Измерительная техника, 2019. – № 5. – С. 14-21.
4. Chunovkina A.G., Stepanov A.V., Wimmer G. On estimation of linear regression confidence bands: Analytical solution and Monte Carlo simulation. *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XII*, 2022, pp. 188-196.
5. Staudenmayer J. Buonaccorsi J. Measurement Error in Linear Autoregressive Models. *Journal of the American Statistical Association*, 2005, 100(471), pp. 841-852, DOI:10.1198/016214504000001871 .
6. Cox M., Harris P. Statistical error modelling. NPL Report (2004) CMSC 45/04.
7. Allan D. Should the classical variance be used as a basic measure in standards metrology? *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1987, IM-36(2), pp. 646-654, DOI: 10.1109/TIM.1987.6312761.
8. Vernotte F., Lantz E. Metrology and 1/f noise: Linear regressions and confidence intervals in flicker noise context. *Metrologia*, 2015, 52(2), pp. 222-237, DOI: 10.48550/arXiv.1407.7760
9. Stepanov A., Chunovkina A., Katkov A. Evaluation of Zener Standard Drifts. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, Paris, France, 2018, pp. 1-2.
10. Код приложения. – URL: <https://github.com/stepanov17/imt-2025> (дата обращения: 10.12.2025).
11. Kotz S, Van Dorp J.R. Beyond beta: other continuous families of distributions with bounded support and applications. *World Scientific Publishing*, Singapore, 2004, DOI:10.1142/9789812701282.

Степанов Александр Владимирович. К.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической метрологии, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева (ВНИИМ). AuthorID: 875816, SPIN: 9570-8972, ORCID: 0000-0002-5917-1037, stepanov17@yandex.ru. 190005, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 19.

UDC 519.233.5

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.013

On the software implementation of the Monte Carlo method for estimating confidence bands of linear regression

Aleksandr V. Stepanov

D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), Russia, St. Petersburg, stepanov17@yandex.ru

Abstract. The paper addresses the problem of calculating uncertainty bands for linear regression with correlated input data. To estimate confidence bands, the generalized least squares method is applied. To determine their boundaries, a coverage factor is introduced; when multiplied by the standard uncertainty of the regression at specific points, this factor yields the required limits. The relevance of this research stems from the fact that standard methods for constructing confidence intervals, based on the assumption of independent errors, lead to a systematic underestimation of the uncertainty band width in the presence of autocorrelation. This, in turn, creates a false impression of forecast accuracy and may result in erroneous statistical conclusions. To construct confidence bands correctly, the structure of the temporal dependence of errors must be taken into account. This study considers the following models of correlated noise: autoregressive processes with exponential correlation decay, and colored noise characterized by power-law decay and long-term memory.

Unlike the classical case of independent errors, where the coverage factor corresponds to a quantile of the normal distribution, no analytical expression exists for this factor in the presence of correlation. The value of the factor directly depends on the structure of the error covariance matrix, the training sample size, and the forecasting horizon. To determine it, the paper employs a numerical Monte Carlo method combined with an iterative bisection procedure, which allows finding the coverage factor with a specified accuracy.

Specialized software has been developed in Python using the NumPy and SciPy libraries. The software implementation solves the problem of estimating hyperbolic-shaped linear regression bands when the error correlation structure is described by the aforementioned models. Corresponding examples for estimating the coverage factor and regression bands are provided, along with a link to the software implementation. The modular architecture of the developed program allows for expansion to other types of correlation structures. The applicability of the work is due to the need for correct uncertainty estimation in the statistical processing of experimental data obtained during the solution of measurement problems.

Keywords: linear regression, confidence bands, generalized least squares, correlated noise, colored noise, Monte Carlo method, numerical methods

References

1. Lee J., Lund R. Revisiting Simple Linear Regression with Autocorrelated Errors. *Biometrika*, 2004, 91(1), pp. 240–245, DOI:10.1093/biomet/91.1.240.
2. Safi S., White A. The Efficiency of OLS in the presence of auto-correlated disturbances in regression models. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 2006, 5(1), pp. 133-143, DOI:10.22237/jmasm/1146456540.
3. Stepanov A.V., Chunovkina A.G. Ocenivanie doveritel'nyh polos dlya linejnoj regressii pri korrelirovannyh vhodnyh dannyh [Estimation of linear regression bands for correlated input data]. *Izmeritel'naya Tekhnika [Measurement Techniques]*, 2019, № 5, pp. 14-21.
4. Chunovkina A.G., Stepanov A.V., Wimmer G. On estimation of linear regression confidence bands: Analytical solution and Monte Carlo simulation. *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XII*, 2022, pp. 188-196.
5. Staudenmayer J. Buonaccorsi J. Measurement Error in Linear Autoregressive Models. *Journal of the American Statistical Association*, 2005, 100(471), pp. 841-852, DOI:10.1198/016214504000001871 .
6. Cox M., Harris P. Statistical error modelling. NPL Report (2004) CMSC 45/04.
7. Allan D. Should the classical variance be used as a basic measure in standards metrology? *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1987, IM-36(2), pp. 646-654, DOI: 10.1109/TIM.1987.6312761.
8. Vernotte F., Lantz E. Metrology and 1/f noise: Linear regressions and confidence intervals in flicker noise context. *Metrologia*, 2015, 52(2), pp. 222-237, DOI: 10.48550/arXiv.1407.7760
9. Stepanov A., Chunovkina A., Katkov A. Evaluation of Zener Standard Drifts. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, Paris, France, 2018, pp. 1-2.
10. The application code. Available at <https://github.com/stepanov17/imt-2025> (accessed: 12/10/2025).
11. Kotz S, Van Dorp J.R. *Beyond Beta: Other Continuous Families of Distributions with Bounded Support and Applications*. World Scientific Publishing, Singapore, 2004, DOI:10.1142/9789812701282.

Stepanov Aleksandr Vladimirovich. Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher at the Laboratory of Theoretical Metrology, D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM). AuthorID: 875816, SPIN: 9570-8972, ORCID: 0000-0002-5917-1037, stepanov17@yandex.ru. 190005, Russia, St. Petersburg, Moskovsky pr., 19.

Статья поступила в редакцию 01.11.2025; одобрена после рецензирования 09.12.2025; принята к публикации 10.02.2026.

The article was submitted 11/01/2025; approved after reviewing 12/09/2025; accepted for publication 02/10/2026.

УДК 004.93'12

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.014

Программные средства для оценки выполнения физических упражнений

Кораблева Марина Дмитриевна, Бекенева Яна Андреевна

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В.И. Ульянова (Ленина), Россия, Санкт-Петербург, marinkakd.ru23322@gmail.com

Аннотация. В современном мире наблюдается растущий интерес к мобильным приложениям для занятий спортом. Эта тенденция обусловлена ускоряющимся темпом жизни, нехваткой времени на посещение фитнес-центров и растущей потребностью людей в поддержании необходимого уровня физической активности. Цифровые платформы предлагают пользователям разнообразные тренировочные программы: специализированные комплексы для проработки различных мышечных групп, программы кардионагрузок, индивидуальные планы тренировок с учётом уровня подготовки, целей и ограничений пользователя. Главным преимуществом таких приложений является возможность тренироваться в любом месте и в любое время. Однако существенный недостаток подобных приложений заключается в отсутствии профессионального контроля за правильностью выполнения упражнений. Неверная техника может не только снизить эффективность занятий, но и привести к травмам, например, растяжениям, повреждениям суставов и мышц. Особенно это критично для начинающих спортсменов, которые ещё не освоили базовые упражнения и технику безопасности при их выполнении. Целью работы является создание интеллектуальной системы оценки качества выполнения физических упражнений. Принцип работы основан на анализе видеопотока с камеры устройства пользователя, сравнении техники выполнения с эталонной моделью и автоматическом распознавании эталонной техники тренера. Процесс тренировки сопровождается визуальной обратной связью: индикацией корректных положений тела, выявлением ошибок в технике выполнения, отображением положения ключевых точек тела (суставов, конечностей и т.д.) в режиме реального времени. Такой подход позволяет пользователям получать качественную обратную связь мгновенно, что значительно повышает эффективность тренировок и снижает риск получения травм из-за неправильной техники. Система может давать рекомендации по корректировке позы, темпа и амплитуды движений, делая самостоятельные занятия спортом безопаснее и результативнее. В работе продемонстрирована возможность применения разработанной системы для выполнения статичных упражнений, например, при занятиях йогой. Дальнейшее направление исследования и разработки связано с динамическими упражнениями и значительным расширением функциональности и сферы применения системы.

Ключевые слова: программные средства для фитнеса, физические упражнения, компьютерное зрение, обработка изображений, определение поз, ключевые точки

Цитирование: Кораблева М.Д. Программные средства для оценки выполнения физических упражнений / М.Д. Кораблева, Я.А. Бекенева // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 189-198 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.014.

Введение. Популяризация здорового образа жизни повлияла не только на увеличение числа спортивных секций и студий фитнеса, но и на развитие соответствующих технологий. Согласно исследованиям, всё больше людей заинтересованы в формировании и поддержании правильных пищевых привычек и регулярном выполнении физических упражнений. Развивается направление корпоративного спорта [1], подразумевающее вовлечение в спортивные занятия сотрудников организаций. Направления физкультурно-спортивной деятельности широко представлены в учебных заведениях [2]. Согласно результатам опубликованных исследований, около 77,8% населения России уделяют время фитнесу и спорту [3]. Однако не все готовы регулярно посещать спортивные залы или индивидуальные тренировки. Среди наиболее частых причин выделяют временные и финансовые затраты, стеснительность при посещении групповых занятий [4, 5]. Такие люди предпочитают в домашних условиях выполнять упражнения, увиденные по телевизору или в интернете. Стоит отметить, что люди, посещающие спортивные секции, тоже предпочитают короткие домашние тренировки в качестве ежедневной рутины. Несомненным преимуществом таких тренировок является возможность

легко встроить их в повседневный график, например, выполнять короткие серии упражнений во время перерывов.

Существует множество мобильных приложений для самостоятельных занятий фитнесом. Отмечается, что существенный рост их популярности приходится на 2020, т. е. период пандемии [3] и с тех пор продолжает расти. Например, приложение Starva, разработанное для профессиональных спортсменов, используют более 100 миллионов пользователей, а приложение Google Fit для подсчета количества шагов было скачано пользователями более 50 миллионов раз [6]. Как правило, мобильные приложения занятий фитнесом содержат наборы упражнений, которые предлагаются пользователю в рамках тренировки. Это позволяет выполнять составленные профессионалами комплексы, включающие в себя разминку, основную часть и заминку, а разнообразие упражнений поддерживает интерес к тренировкам. Однако возникает вопрос о безопасности проведения тренировок в домашних условиях без какого-либо контроля.

Стоит отметить, что существующие приложения для фитнеса разработаны для смартфонов и не имеют аналогов для использования на ПК. Целью работы являлась разработка десктопного программного инструмента для мониторинга и оценки качества выполнения упражнений с помощью компьютерного зрения.

1. Релевантные работы. Большинство существующих фитнес-приложений, например, Nike Training Club, Fitness Online или ProFit функционирует по общему принципу [7]. При первом запуске пользователю предлагается оценить уровень физической подготовки посредством выполнения тестового набора упражнений и предоставления обратной связи. Формирование набора тренировочных упражнений происходит на основе результата оценки, а также пожеланий пользователя, которые задаются в настройках. Пользователю предлагается указать количество тренировок в неделю, предпочтения относительно задействованных групп мышц и ограничения. Как правило, все настройки могут быть изменены в любой момент времени.

Перед проведением тренировки пользователю предоставляются инструкции по выполнению упражнений, которые содержат как текстовые описания, так и видеозаписи. Отдельно отмечаются важные особенности и типичные ошибки. Приступая к тренировке, пользователю предлагается нажать кнопку запуска, что одновременно приводит к включению секундомера и началу отображения упражнений по порядку. Большинство современных приложений регистрируют время, затраченное на тренировку, а также количество потраченных калорий, которое вычисляется для каждого упражнения без учета реального качества их выполнения. После окончания тренировки пользователю предлагается отправить обратную связь и оценить сложность предложенного комплекса, усталость, положительные и негативные ситуации.

Несомненными преимуществами таких приложений является экономия временных и финансовых затрат за счет отсутствия необходимости идти или ехать в спортивную студию, а цена подписки на фитнес-приложение значительно ниже цены абонемента в спортивный зал. Однако во время очных тренировок есть возможность немедленной корректировки в случае неправильного выполнения упражнения. При необходимости тренер может пояснить ошибку, помочь её исправить, а также предотвратить потенциально опасные ситуации, результатом которых может стать травмирование.

Проблема отсутствия мониторинга со стороны мобильных приложений может быть решена средствами компьютерного зрения. На данный момент существуют несколько приложений с внедренным искусственным интеллектом, среди которых: Infigro [8], DeepSport [9] и ALPHA AI Coach [10].

Infigro – это инновационная платформа для домашних тренировок, которая помогает пользователям совершенствовать технику выполнения упражнений. Основной принцип ра-

боты заключается в использовании мобильного приложения, поскольку веб-версия не предусмотрена. Платформа содержит более ста разнообразных тренировочных программ, охватывающих множество направлений фитнеса. Тренировка проходит следующим образом: на экране телефона показывается правильное выполнение упражнения, а камера устройства фиксирует движения пользователя. Система анализирует технику выполнения и сразу же даёт рекомендации по улучшению. К особенностям платформы можно отнести голосовые подсказки при обнаружении ошибок, визуальный индикатор точности выполнения в процентах, подробная статистика после завершения тренировки. В отличие от некоторых аналогичных приложений, *Infigo* не использует технологию наложения контрольных точек на изображение пользователя для анализа техники, что может создавать определенные неудобства при тренировке. Однако система компенсирует это за счет других механизмов обратной связи. По завершении занятия пользователь получает полную информацию о его эффективности, включая процент точности выполнения и детальный анализ результатов тренировки.

DeepSport представляет собой мобильное приложение для эффективных домашних тренировок, не требующих специального спортивного инвентаря. Принцип работы приложения построен на инновационной технологии распознавания положения тела пользователя в режиме реального времени. Система анализирует движения и предоставляет мгновенную обратную связь через голосовые подсказки, звуковые сигналы, визуальное сопровождение. Интерфейс тренировки включает в себя демонстрационное видео с эталонным выполнением упражнения и прямую трансляцию с камеры телефона, где отображаются ключевые точки тела для контроля техники. Система оценки позволяет пользователю отслеживать правильность выполнения упражнений в процентах, получать детальную статистику после каждой тренировки и анализировать свой прогресс. Такой комплексный подход делает тренировки максимально эффективными и безопасными, помогая пользователям достигать своих фитнес-целей в домашних условиях.

Alpha AI Coach – это мобильное приложение для персональных тренировок, разработанное для достижения различных фитнес-целей: от похудения до поддержания физической формы. Функциональные возможности приложения включают анализ движений пользователя через камеру смартфона в режиме реального времени, интеллектуальные подсказки по улучшению техники выполнения, визуальное отображение ключевых точек тела на экране, подсчёт базовых показателей тренировки. Текущая база содержит около 10 различных упражнений, что ограничивает возможности её использования. Система предоставляет базовые голосовые инструкции (например, «поднимитесь» или «опуститесь»), при этом отсутствует возможность предоставления более конкретных инструкций. Отсутствует демонстрация эталонного выполнения упражнений, что может затруднить освоение правильной техники. Также не предусмотрена возможность составлять комплексы для отдельной тренировки, поэтому пользователю необходимо самостоятельно планировать последовательность упражнений и число подходов. Система оценки ограничивается только такими количественными показателями, как продолжительность тренировки, расчёт потраченных калорий. Несмотря на наличие полезных функций, таких, как отображение ключевых точек тела, приложение имеет существенные ограничения в плане обратной связи и автоматизации тренировочного процесса.

В России также появляются разработки с применением искусственного интеллекта. Например, мобильное приложение *SportAchieve Partner* [11] предоставляет возможность получать скидки у партнеров при правильном выполнении упражнений заданное количество раз. Приложение призвано решить проблему низкой мотивации к занятиям спортом, предлагая пользователям реальные бонусы за физическую активность. Приложение активно развивается, однако на данный момент не содержит видеоинструкции к выполнению упражнений, а также

отсутствует голосовой помощник. Основной идеей приложения является возможность получения промокодов за правильно выполненные задания, и, хоть это является повышением мотивации к выполнению физических упражнений, пока еще не может считаться приложением для проведения тренировок с целью проработки определенных групп мышц. Кроме того, следует учитывать, что пользователи могут выбирать более простые для себя упражнения, а также превышать нагрузку, желая получить больше скидков.

Приложение Fittonic [12] разработано при участии специалистов и тренеров, содержит обширный набор упражнений и предлагает возможность индивидуализации тренировок. Однако, в настоящее время, доступна только версия для iOS, что ограничивает возможности использования.

Технологии компьютерного зрения применяются и в более узкоспециализированных отраслях спорта. Например, российская разработка BD-Sport [13] позволяет анализировать технику упражнений в художественной гимнастике, спортивной гимнастике, прыжках в воду и др.

Важно отметить, что все рассмотренные решения являются мобильными приложениями. Однако отсутствуют инструменты, которые можно было бы использовать на ПК или ноутбуке. Разработка настольных приложений могла бы повысить круг лиц, использующих компьютерные технологии для проведения домашних фитнес тренировок.

2. Программные средства распознавания образов. Для разработки программного обеспечения было принято решение выбрать готовый фреймворк среди существующих. По умолчанию, любое фитнес-приложение разрабатывается для единоличного использования, следовательно, требуется распознавание в кадре только одного человека. Таким образом, в результате анализа существующих средств распознавания образов были рассмотрены YOLO v7 [14] и Mediapipe [15], предварительно обученные на датасете COCO (Common Object in Context) [16], который представляет собой набор, содержащий 330 000 различных изображений и 1,5 миллиона экземпляров объектов.

YOLO (You Only Look Once) представляет собой революционный алгоритм, разработанный для классификации и идентификации объектов, как на статических изображениях, так и в видеопотоке. Автором алгоритма является Джозефа Рэдмонда, представивший и опубликовавший результаты своей работы в 2015-2016 гг. Главными преимуществами технологии YOLO являются высокая скорость обработки данных, высокая точность распознавания объектов, относительная простота процесса обучения модели. Популярность алгоритма обусловлена его эффективностью в сфере компьютерного зрения, что привело к появлению более десяти различных модификаций YOLO от различных разработчиков. Наибольший интерес в контексте поставленной задачи представляет версия YOLOv7, отличающаяся способностью выделять структуру скелета и возможностью анализа позы человека на каждом кадре видео.

Mediapipe – разработка компании Google, история которой началась в 2012 году. Основной целью создания являлось решение задачи обработки видео- и аудиоконтента в режиме реального времени на видеохостинге YouTube. Эволюция технологии привела к её интеграции в различные продукты Google. Важным этапом развития стал 2019 год, когда платформа стала доступной для сторонних разработчиков, что открыло новые возможности для развития технологий компьютерного зрения. Принцип работы Mediapipe основан на создании единой модели человека, которая непрерывно отслеживается на протяжении всего видеопотока. Ключевые возможности фреймворка включают детальное распознавание лиц (face mesh), точное определение положения тела, идентификация отдельных частей тела. Mediapipe отличается минимальными требованиями к ресурсам (достаточно мощности графического процессора), потенциальной кроссплатформенностью и высокой эффективностью обработки данных.

В отличие от YOLO, Mediapipe демонстрирует лучшие показатели при разработке пользовательских приложений, требующих обработки видео в реальном времени и точного отслеживания объектов. Это делает его предпочтительным выбором для создания решений в области компьютерного зрения.

Mediapipe характеризуется более простой по сравнению с YOLO архитектурой системы, минимальными потерями кадров во время работы, а также возможностью отслеживания движений практически в реальном времени (с незначительной задержкой). Точность анализа Mediapipe Pose существенно выше благодаря отслеживанию большего количества точек на теле, возможности анализа положения ступней и пальцев, детальной оценке правильности выполнения упражнений. Особое значение точность отслеживания имеет при занятиях йогой, где важна правильная постановка стоп, и даже незначительные отклонения могут привести к травмам, например, растяжениям.

Таким образом, для тренировок, требующих детального анализа положения тела, особенно в области стоп и пальцев, Mediapipe демонстрирует явное преимущество перед YOLOv7, что делает его более подходящим решением для фитнес-приложений.

Для обнаружения человека на фото или видео используется модель, состоящая из 33 точек тела человека, показанная на рисунке 1. Каждая точка сопровождается следующими характеристиками:

- положению этой точки в координатах (x; y; z), где параметр z описывает глубину точки и может быть, как отрицательным, так и положительным числом, а x и y описывают положение точки относительно ширины и высоты изображения;
- параметре видимости, интересующей нас точки – visibility: visibility in [0; 1].

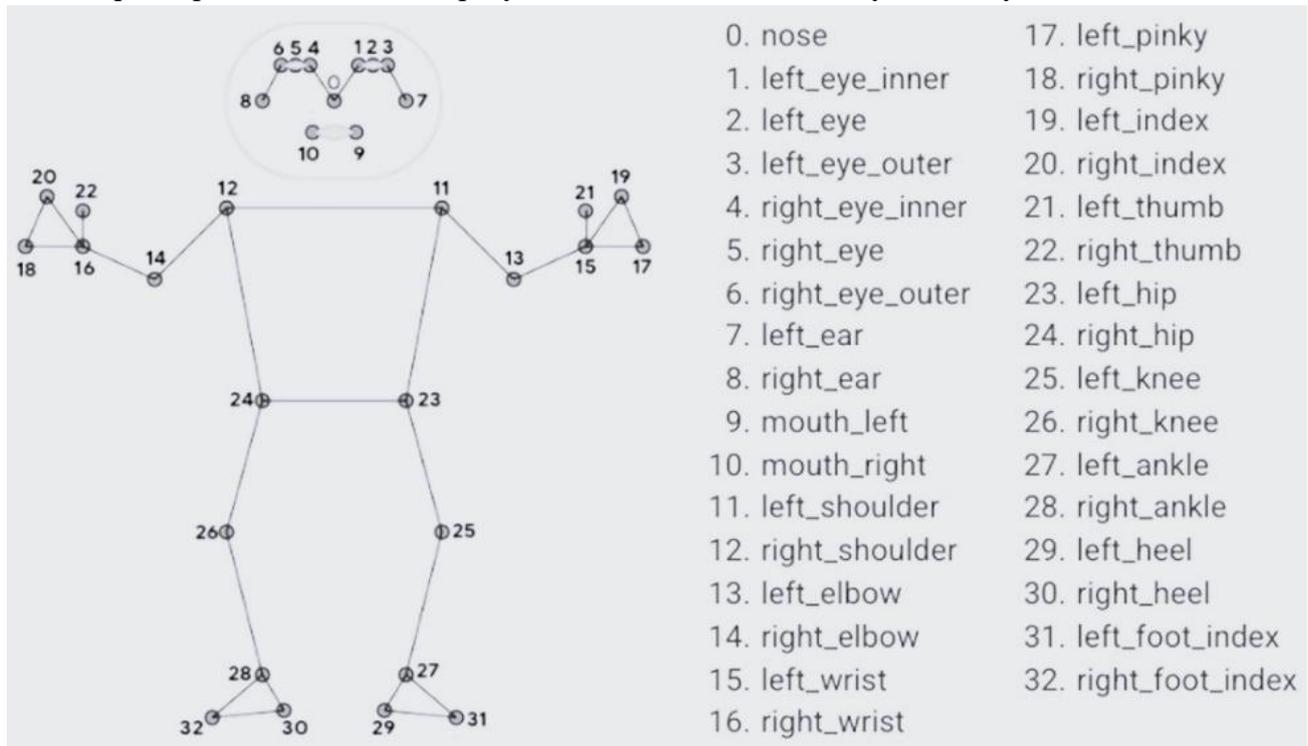


Рис. 1. Представление ключевых точек человека

С помощью этого фреймворка можно реализовать технологию сравнения пользовательской позы и эталонно исполненной позы, заложенной в программу, и внедрить ее в разработанное программное обеспечение.

3. Описание подхода к мониторингу и оценке выполнения упражнений. Основной идеей предлагаемого подхода является непрерывное сопоставление эталонной модели выполнения упражнения и выполнения этого же упражнения пользователем в режиме реального времени.

Любое упражнение представляет собой упорядоченную и согласованную последовательность движений различных частей тела. Эталонная модель представляет собой желаемую последовательность движений с точно определенной амплитудой и расположением как тела в пространстве, так и отдельных частей тела относительно друг друга. Следовательно, необходимо определить ключевые точки для каждой позы, принимаемой человеком во время выполнения упражнения.

В общем виде, для сравнения двух поз может быть использован следующий алгоритм, который сопровождается рисунком 2 (необходимо отметить, что на иллюстрации отмечены только 13 точек вместо 33 – рисунок 1, так как использовать все для примера нецелесообразно):

1. Необходимо определить следующие точки на теле человека и их координаты (x, y): левое плечо, правое плечо, левое бедро, правое бедро (точки 1, 2, 3 и 4 соответственно). Глубина z не используется, так как рассматривается угловое сравнение.
2. Необходимо найти точки C_12 и C_34 таким образом, чтобы точка C_12 была центром точек 1 и 2, а C_34 – центром точек 3 и 4.
3. Перебираем все ключевые точки модели. Каждой точке пользователя сопоставляем такую же точку эталонной модели (на рисунке 2 представлена точка N).
4. Правило: при сравнении верхней части тела (голова, руки, плечи) используется точка C_12, при сравнении нижней – C_34. Поскольку как начало отрезка выбрана точка N, относящаяся к верхней части тела, то концом отрезка будет точка C_12. Таким образом получим две прямые, проходящие через отрезки (C_12 N)_п и (C_12 N)_э.
5. Далее определяется угол между двумя прямыми – alpha. Сравнив этот угол с углом нормального отклонения – angular_deviation, можно сделать вывод о корректности расположения ключевой точки.

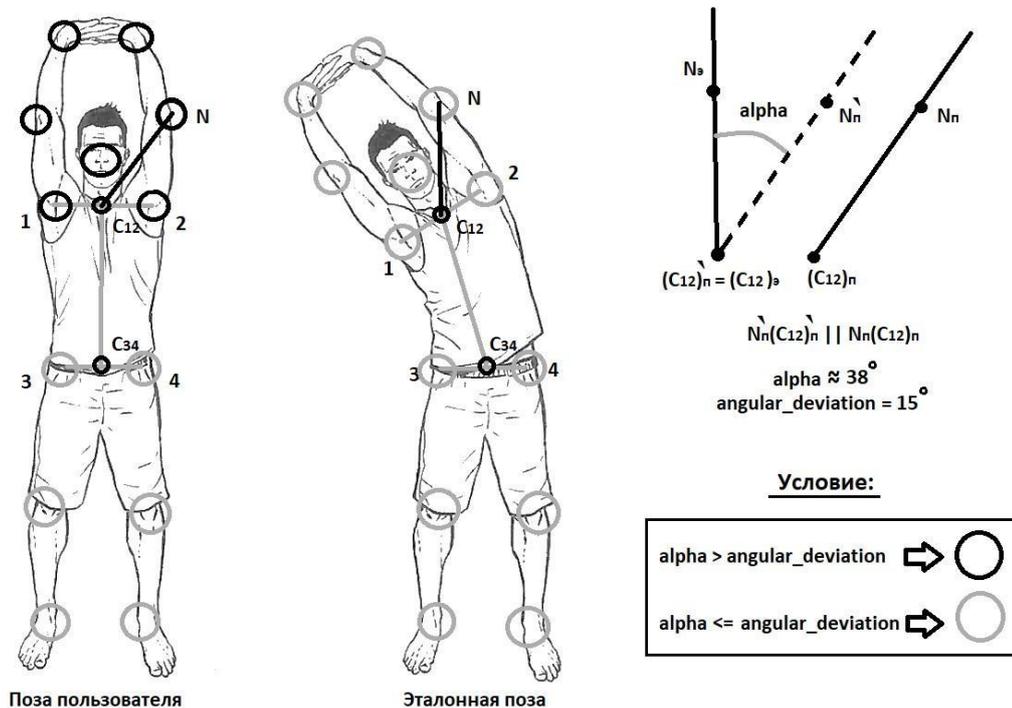


Рис. 2. Иллюстрация процесса сравнения

При первоначальной реализации программного продукта было принято решение установить величину отклонения *angular_deviation* равной 15° для всех возможных углов. В настоящее время ведется исследование по выявлению возможных отклонений для разных частей тела и отдельных суставов при выполнении разных упражнений.

4. Программная реализация. В настоящее время разработано десктопное приложение, анализирующее статическое положение пользователя и направленное на оценку правильности выполнения асан из йоги. На рисунках 3 и 4 представлены иллюстрации работы приложения в случаях корректного и некорректного исполнения пользователем отдельно взятой асаны.

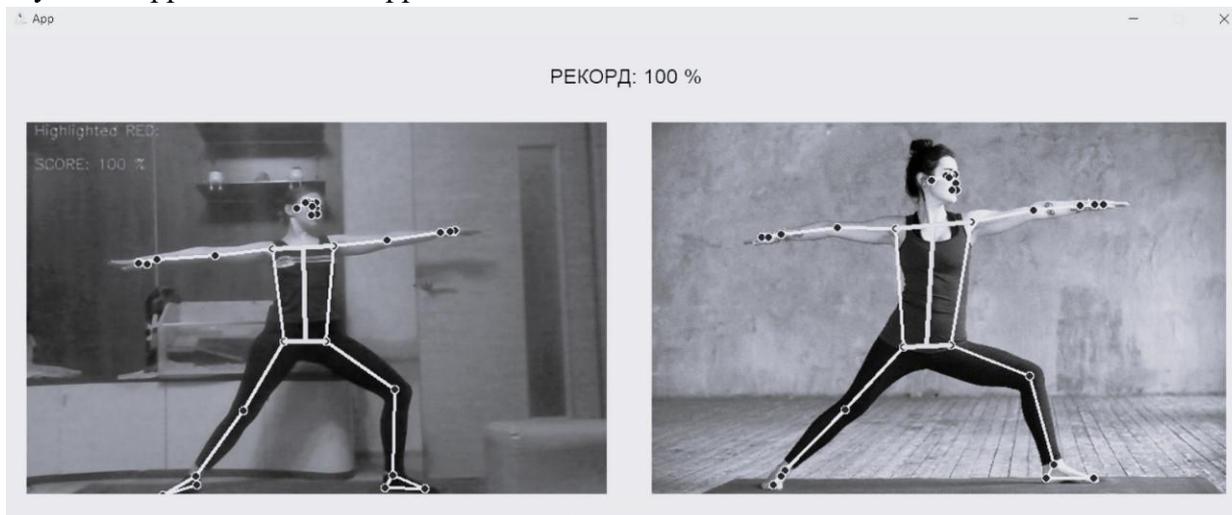


Рис. 3. Корректное исполнение асаны

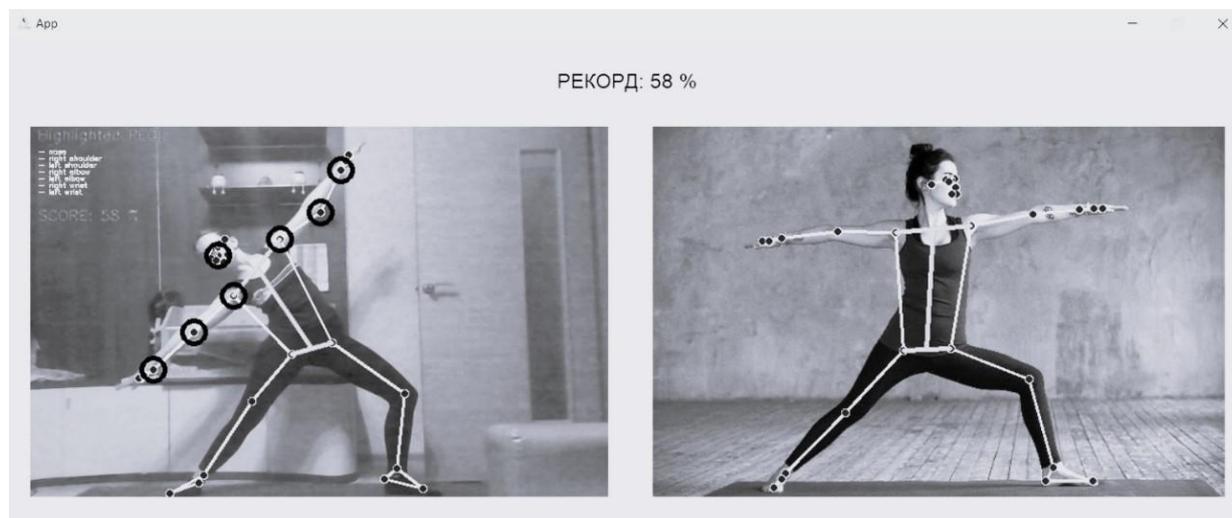


Рис. 4. Некорректное исполнение асаны

Также ведется расширение возможностей приложения, а именно оценка выполнения динамических упражнений. Получены результаты для таких упражнений, как отжимания, приседания, выпады, махи руками и ногами.

Заключение. В результате выполненной работы было создано десктопное приложение, которое способствует повышению продуктивности самостоятельных занятий фитнесом за счет предоставления обратной связи в режиме реального времени и корректировки положения пользователя. Мониторинг действий пользователя осуществляется с помощью камеры ноутбука или веб-камеры. Для анализа действий пользователя используются инструменты компьютерного зрения, для оценки корректности выполнения упражнений осуществляется непрерывное сравнение с эталонной моделью. Система оперативно указывает на ошибки, что способствует повышению эффективности тренировок и снижению риска травм.

В качестве дальнейших этапов развития приложения намечены следующие доработки:

- определение возможных допустимых углов отклонения для различных упражнений и разных частей тела;
- учет индивидуальных особенностей пользователя для оценки его физических возможностей и подборе подходящих упражнений.

Кроме того, интерес представляет также построение паттернов движения в каждом упражнении и учет скорости его выполнения. Эти направления исследований и разработки позволят расширить функциональность предлагаемой системы и повысить эффект от её применения.

Особый интерес представляет персонализация системы для возможности гибкой адаптации к возможностям пользователя и развитию его двигательных способностей.

Список источников

1. Николаева И.В. Развитие корпоративного спорта в России / И.В. Николаева, В.А. Казначеев // Международный журнал гуманитарных и естественных наук, 2024. – № 8-1 (95). – С. 60-62.
2. Буханова О.Н. Анализ физкультурно-спортивной деятельности студенческой молодежи в условиях досуга // Актуальные проблемы теории и практики физической культуры, спорта и туризма, 2024. – Т. 1. – С. 371-373.
3. Кузнецов В.А. Фитнес как модная тенденция в современном мире / В.А. Кузнецов, А.А. Зеленова, О.В. Сесорова // Глобальный научный потенциал, 2024. – Т. 11(164). – С. 121-123.
4. Zourladani A., Ntovoli A., Alexandris K. Traditional exercise vs. online fitness classes: a comparison based on participants' enjoyment. Retos, 2024, vol. 61, pp. 714-721.
5. Морозов М.В. Современные тенденции в физической культуре: вызовы и возможности / М.В. Морозов, К.А. Афонькина // Международный журнал гуманитарных и естественных наук, 2024. – № 9-4 (96). – С. 165-167.
6. Сираковская Я.В. Применение современных фитнес-приложений для активного мониторинга уровня здоровья и физического состояния взрослого населения. – URL: <https://phsreda.com/e-articles/10748/Action10748-149699.pdf> (дата обращения: 08.10.2025).
7. Yamini S., Gajanand M.S. A qualitative analysis of customer acquisition in online fitness communities. International Journal of Enterprise Network Management, 2025, vol. 16, no. 1, pp. 1-22.
8. infiGro | Infivolve. Available at: <https://www.infivolve.com/> (accessed: 06/06/2025).
9. DeepSport Athletic – AI Athlete Development. Available at: <https://deepsportapp.com/> (accessed: 05/06/2025).
10. Artificial Intelligence Fitness Coach | ALFA AI. Available at: <https://www.alfa-ai.com/> (accessed: 06/06/2025).
11. SportAchieve. Available at: <https://sportachieve.ru/> (accessed: 10/08/2025).
12. Fittonic. Available at: <https://fittonic.app/> (accessed: 10/08/2025).
13. BD-Sport. Available at: <https://bd-sport.com> (accessed: 10/08/2025).
14. YOLOv7: A Powerful Object Detection Algorithm. Available at: <https://viso.ai/deep-learning/yolov7-guide/> (accessed: 06/06/2025).
15. MediaPipe Solutions guide. Available at: <https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/guide> (accessed: 06/06/2025).
16. COCO – Common Object in Context. Available at: <https://cocodataset.org/> (accessed: 06/06/2025).

Кораблева Марина Дмитриевна. Студент СПбГЭТУ «ЛЭТИ», инженер-программист «АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Направления исследования: алгоритмы машинного и глубокого обучения. AuthorID: 1301353, SPIN: 2890-2040, ORCID: 0009-0005-6579-7932. marinkakd.ru23322@gmail.com. 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ».

Бекенева Яна Андреевна. Кандидат технических наук, доцент каф. ВТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Направления исследования: обработка данных в распределенных системах, методы машинного и глубокого обучения, обработка не идентично распределенных данных в системах федеративного обучения. AuthorID: 1038788, SPIN: 2233-2853, ORCID: 0000-0002-7110-6000. yabekeneva@eti.ru. 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора По

UDC 004.93'12

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.014

Software tools for assessing exercise performance

Marina D. Korableva, Yana A. Bekeneva

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Russia, Saint Petersburg, *marinkakd.ru23322@gmail.com*

Abstract. In recent years, applications providing users with physical activity programs have become very popular. This trend is driven by the accelerating pace of life, the lack of time to visit fitness centers, and the growing need to maintain a healthy level of physical activity. Digital platforms offer users a variety of training programs: specialized workouts for various muscle groups, cardio programs, and customized training plans tailored to the user's fitness level, goals, and limitations. The main advantage of such apps is the ability to train anywhere and anytime. However, a significant drawback of such apps is the lack of professional supervision to ensure proper exercise performance. Incorrect technique can not only reduce the effectiveness of workouts but also lead to injuries, such as strains, joint damage, and muscle damage. This is especially critical for beginners who have not yet mastered basic exercises and safety precautions. The goal of this work is to create an intelligent system for assessing the quality of exercise performance. The system is based on analyzing the video stream from the user's device camera, comparing the user's technique with a reference model, and automatically recognizing the trainer's reference technique. The training process is accompanied by visual feedback: indication of correct body position, detection of technique errors, and display of key body points (joints, limbs, etc.) in real time. This approach allows users to receive high-quality feedback immediately, significantly increasing the effectiveness of training and reducing the risk of injury due to improper technique. The system can provide recommendations for adjusting posture, tempo, and range of motion, making independent exercise safer and more effective. The study demonstrated the feasibility of using the developed system for static exercises, such as yoga. Further research and development focuses on dynamic exercises and significantly expanding the system's functionality and scope of application.

Keywords: Fitness software, exercise, computer vision, image processing, pose detection, key points

References

1. Nikolaeva I.V., Kaznacheev V.A. Razvitiye korporativnogo sporta v Rossii [Development of corporate sports in Russia]. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [International journal of humanities and natural sciences], 2024, no. 8-1 (95), pp. 60-62.
2. Bukhanova O.N. Analiz fizkul'turno-sportivnoy deyatel'nosti studencheskoy molodezhi v usloviyakh dosuga [Analysis of physical culture and sports activities of student youth in leisure conditions]. *Aktual'nyye problemy teorii i praktiki fizicheskoy kul'tury, sporta i turizma* [Actual problems of theory and practice of physical culture, sports and tourism], 2024, vol. 1, pp. 371-373.
3. Kuznetsov V.A., Zelenova A.A., Sesorova O.V. Fitnes kak modnaya tendentsiya v sovremennom mire [Fitness as a fashion trend in the modern world]. *Global'nyy nauchnyy potentsial* [Global scientific potential], 2024, vol. 11(164), pp. 121-123.
4. Zourladani A., Ntovoli A., Alexandris K. Traditional exercise vs. online fitness classes: a comparison based on participants' enjoyment. *Retos*, 2024, vol. 61, pp. 714-721.
5. Morozov M.V., Afonkina K.A. Sovremennyye tendentsii v fizicheskoy kul'ture: vyzovy i vozmozhnosti [Modern trends in physical culture: challenges and opportunities]. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [International journal of humanities and natural sciences], 2024, no. 9-4 (96), pp. 165-167.
6. Sirakovskaya Ya.V. Primeneniye sovremennykh fitnes-prilozheniy dlya aktivnogo monitoringa urovnya zdorov'ya i fizicheskogo sostoyaniya vzroslogo naseleniya [Application of modern fitness applications for active monitoring of the health level and physical condition of the adult population]. Available at: <https://phsreda.com/e-articles/10748/Action10748-149699.pdf> (accessed: 10.08.2025).
7. Yamini S., Gajanand M.S. A qualitative analysis of customer acquisition in online fitness communities. *International Journal of Enterprise Network Management*, 2025, vol. 16, no. 1, pp. 1-22.
8. infiGro | Infivolve. Available at: <https://www.infivolve.com/> (accessed: 06/06/2025).
9. DeepSport Athletic – AI Athlete Development. Available at: <https://deepsportapp.com/> (accessed: 05/06/2025).
10. Artificial Intelligence Fitness Coach | ALFA AI. Available at: <https://www.alfa-ai.com/> (accessed: 06/06/2025).
11. SportAchieve. Available at: <https://sportachieve.ru/> (accessed: 10/08/2025).
12. Fittonic. Available at: <https://fittonic.app/> (accessed: 10/08/2025).
13. BD-Sport. Available at: <https://bd-sport.com> (accessed: 10/08/2025).

14. YOLOv7: A Powerful Object Detection Algorithm. Available at: <https://viso.ai/deep-learning/yolov7-guide/> (accessed: 06/06/2025).
15. MediaPipe Solutions guide. Available at: <https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/guide> (accessed: 06/06/2025).
16. COCO – Common Object in Context. Available at: <https://cocodataset.org/> (accessed: 06/06/2025).

Korableva Marina Dmitrievna. Student of ETU "LETI", software engineer at JSC Concern TsNII Elektropribor. Research areas: machine and deep learning algorithms. AuthorID: 1301353, SPIN: 2890-2040, ORCID: 0009-0005-6579-7932. marinkakd.ru23322@gmail.com. Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 5 Professora Popova street, St-Petersburg, 197022, Russian Federation

Bekeneva Yana Andreevna. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Science, ETU "LETI". Research areas: data processing in distributed systems, machine and deep learning methods, processing of non-identically distributed data in federated learning systems. AuthorID: 1038788, SPIN: 2233-2853, ORCID: 0000-0002-7110-6000. yabekeneva@etu.ru. Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 5 Professora Popova street, St-Petersburg, 197022, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 10.07.2025; одобрена после рецензирования 13.10.2025; принята к публикации 24.02.2026.

The article was submitted 07/10/2025; approved after reviewing 10/13/2025; accepted for publication 02/24/2026.

УДК 81.33

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.015

Разработка программы «Калькулятор лингвиста»**Боровский Андрей Викторович, Мосоркин Федот Эдуардович**Байкальский государственный университет, Россия, Иркутск, *mosorkin@bk.ru*

Аннотация. В статье описывается разработка программного обеспечения для исследований в области историко-математической лингвистики, в которых используются мультиметрический подход и метод анализа иерархий. Программа реализована в виде десктопного приложения на языке программирования Python. Для разработки графического интерфейса применена библиотека PyQt5. Рассмотрены и реализованы актуальные математические методы для исследований в историко-математической лингвистике, такие, как: преобразования слов Долгопольского А.Д. в консонантные классы, различные метрики сходства слов (учитывающие количество одинаковых букв в двух словах (Рэтклиффа-Обершелпа или RO), количество букв в наибольшей общей подстроке (LCS), количество элементарных операций по совмещению слов (расстояние Левенштейна или L)). Новизна работы заключается в применении к анализу списка соответствий мультиметрического подхода и выстраивание рейтингов на основе метода анализа иерархий. Используя «Калькулятор лингвиста», можно выявлять скрытые лексические связи между топонимами и списками слов соответствий, а также проводить исследования происхождения топонимов. Программа апробирована на топонимах Иркутской области с утраченным смыслом и позволяет выявлять наиболее вероятные соответствия среди слов-кандидатов из различных языков: эвенкийский, бурятский, старорусский. Реализованы ввод топонима и слов-кандидатов, выбор модели преобразования слов, вывод и экспорт в Excel-файл отсортированных результатов по убыванию суммы метрик. Проведены процедуры верификации метода анализа иерархии в мультиметрии слов, для чего применены наборы слов, которые были специально изменены для проверки устойчивости метода к искажениям слов. В итоге исследование показало, что алгоритм устойчив к искажениям. При шуме 50% падение качества установления соответствий происходит постепенно. Устойчивость алгоритма к искажениям делает его пригодным для работы с реальными (в том числе с искаженными) топонимами. В будущем планируется добавить функции для количественной оценки заимствований в языках, чтобы расширить ее применение в историко-математической лингвистике для анализа языковых взаимодействий и реконструкции этимологии топонимов Иркутской области.

Ключевые слова: Историко-математическая лингвистика, разработка ПО, консонантные классы, парные метрики Рэтклиффа-Обершелпа, LCS, расстояние Левенштейна

Цитирование: Боровский А.В. Разработка программы «Калькулятор лингвиста» / А.В. Боровский, Ф.Э. Мосоркин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 199-206. – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.015.

Введение. В настоящее время в лингвистике рутинные задачи отнимают значительное количество времени из-за большого объема данных для работы. Чтобы справиться с подобными проблемами, применяют автоматизацию, путем разработки программ для обширных вычислений. Для этой цели было решено реализовать программу «Калькулятор лингвиста».

При работе над топонимами Иркутской области с утраченным смысловым значением авторы столкнулись со следующей проблемой. К конкретному топониму с непонятным для авторов смыслом подбирались похожие по произношению слова из словарей старорусского, эвенкийского, бурятского и других языков. Возникло отношение: топоним – список слов соответствий. Размерность списка могла достигать 10-20 и более. Возникла задача, как математическим путем выстроить рейтинг слов соответствий в найденном списке. Применение какой-то одной парной метрики, описывающей близость слов, не давало необходимого эффекта. В связи с этим авторы предлагают для решения задачи использовать мультиметрический подход и метод анализа иерархий из области системного анализа.

Цель работы – разработать программу «Калькулятор лингвиста», предназначенную для вычисления нескольких парных метрик и выстраивания рейтингов в списках слов соответствий к топониму.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- рассмотреть методы и алгоритмы, применяемые при сравнении слов;
- выявить требования к программе;
- реализовать функционал программы;
- верифицировать методы, примененные в программе.

Методологическое обоснование. Языки имеют свойство со временем меняться, смыслы и звучание старых слов забываются и перестают использоваться в речи. Поэтому в лингвистике используют различную кодировку звучания слов. Например, есть методы сегментации (фонемная и слоговая), фонетические транскрипции (IPA, ARPAbet) и т.п. Однако программа нацелена для работы в области историко-математической лингвистики, поэтому для преобразования слов в программе использованы консонантные классы А. Д. Долгопольского (табл. 1) [1]. В самом программном приложении выделены два типа преобразований:

- Д0: исходные слова без преобразований;
- Д1: преобразование гласных в класс Н и согласных в соответствующий консонантный класс.

Таблица 1. Консонантные классы для русского языка

№	Класс согласных	Буквы русского языка
1	Р-класс	П, Б, В, Ф
2	Т-класс	Т, Д
3	С-класс	С, З, Ц, Ч, Ш, Щ, Ч
4	М-класс	М
5	Н-класс	Н
6	Р-класс	Р, Л
7	К-класс	К, Г, Х
8	Н-класс (нулевой класс)	Все гласные, включая Ё, Ё, Ю, Я

Чтобы оценить сходство слов, были использованы три метрики:

– Рэтклиффа-Обершелпа [4], основанная на гештальтном подходе к сопоставлению слов. Фиксирует фрагментарные совпадения даже при значительных различиях слов. По факту эта метрика указывает долю общих букв без учета порядка их следования в двух словах. Если слова совпадают, то метрика РО равна 1. Если в словах переставлены буквы или слоги, то метрика РО также равна 1. Если слова отличаются хотя бы одной буквой, то метрика РО < 1. Если все буквы в словах разные, то метрика РО равна 0. Метрика РО позволяет существенно ограничить поле для поиска соответствий.

– Наибольшая общая подстрока (Longest Common Subsequence) [5]. Данная метрика выявляет максимально длинную последовательность, общую для двух слов, что информирует о степени их сходства при сохранении порядка элементов. Метрика LCS позволяет забраковать случаи, когда буквенный состав слов близкий, но буквы перемешаны.

– Расстояние Левенштейна [6], равно минимальному числу элементарных операций (вставка, удаление, замена символа), необходимых для преобразования одной строки в другую. Для его реализации в программе был использован алгоритм Вагнера-Фишера [7]. При исторической эволюции слова меняются постепенно, по одной операции на определённом отрезке времени. Поэтому большие значения метрики L указывают на значительную временную удаленность таких изменений.

Для ранжирования списка совпадений в программе используются два метода: мультиметрический и метод анализа иерархий. В мультиметрическом методе используем три метрики: PO, LCS, L. В методе анализа иерархий вводятся объективные критерии для оценки совпадений. В нашем случае выбираем один топоним и для него имеем совокупность слов-совпадений. Для каждого слова из списка совпадений рассчитываются три метрики, другими словами, три критерия. Далее суммируем их и по величине суммы ранжируем список совпадений.

Первые две метрики рассчитываются по формуле

$$\rho = \frac{2K(a,b)}{|a|+|b|}, \quad (1)$$

метрика L рассчитываются по формуле

$$\rho = 1 - \frac{2K(a,b)}{|a|+|b|}, \quad (2)$$

где a – первое слово, b – второе слово, |a|, |b| – количество букв в первом и втором словах, K(a,b) – количество общих букв в каждом слове для метрики PO, количество букв в максимальной общей подпоследовательности с учетом разрывов и порядка следования букв для метрики LCS, количество элементарных операций, переводящих одно слово в другое для метрики L.

Инструменты разработки и этап проектирования. Предлагаемая программа написана на языке программирования Python, как наиболее подходящем для работы с данными. Интерфейс реализован с помощью библиотеки PyQt5 [2-3] в виде десктопного оконного приложения. Чтобы экспортировать результаты в формате Excel-файла, используется библиотека openpyxl [8]. Для составления графиков была использована библиотека matplotlib [9].

Программа «Калькулятор лингвиста» встроена в виде отдельного модуля в программу «Помощник лингвиста» [10], которая разработана для сравнения двух лингвистических списков слов.

Для разработки архитектуры модуля «Калькулятор лингвиста» была сформирована диаграмма прецедентов (Use Case), приведенная на рис. 1. В ней представлены взаимодействия пользователя с программой, выявляющие основные пользовательские требования и сценарий использования приложения.

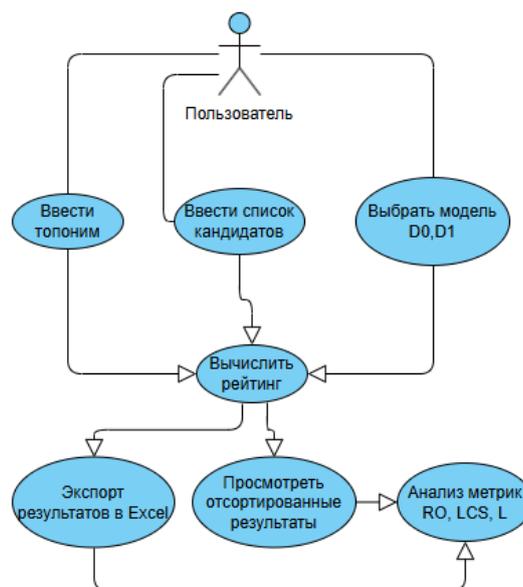


Рис. 1. Use Case-диаграмма прецедентов

Исходя из приведенной диаграммы, составлены следующие требования к модулю:

- простой ввод данных – возможность ручного ввода топонима и списка кандидатов;
- гибкий выбор модели – Д0 или Д1;
- наглядный просмотр результатов, отсортированных по убыванию суммы метрик;
- экспорт результатов – сохранение таблицы с кандидатами и значениями метрик в Excel.

На рис. 2 представлен интерфейс модуля «Калькулятор лингвиста».

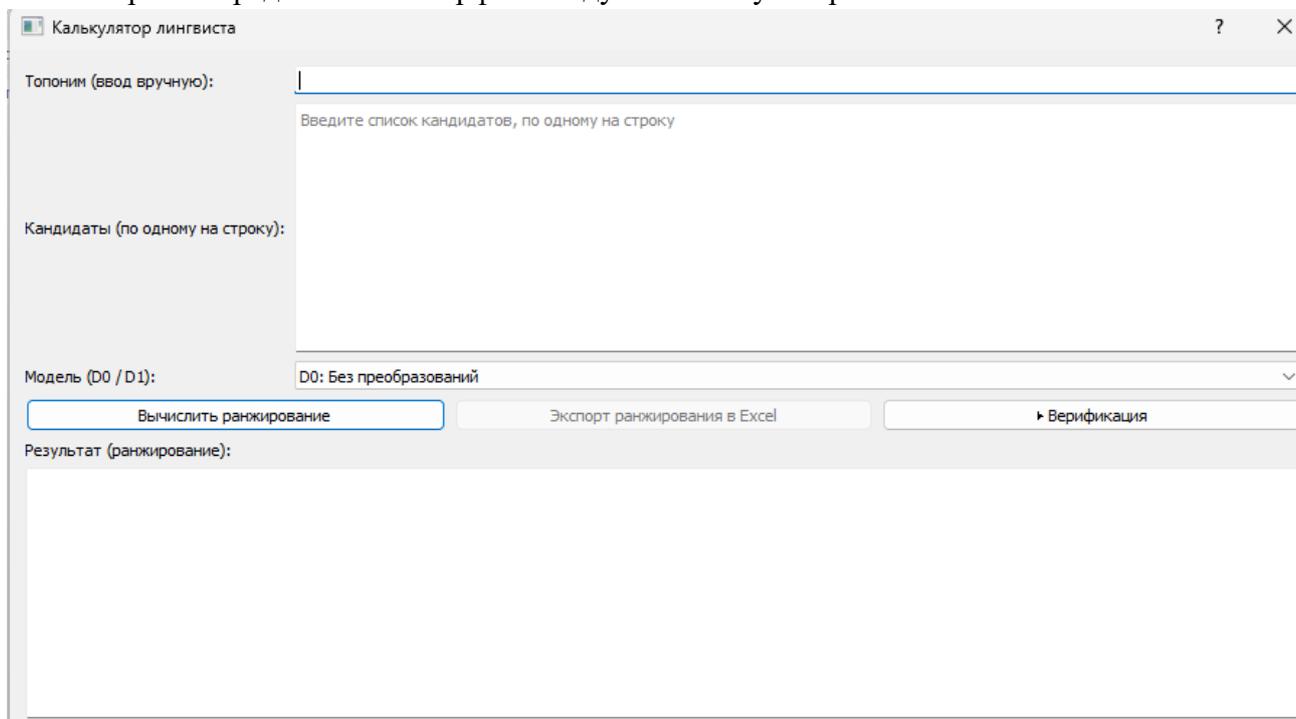


Рис. 2. Интерфейс модуля «Калькулятор лингвиста»

Алгоритм работы: вводим топоним, затем построчно вставляем список похожих слов. При необходимости можно выбрать модель преобразования слов Д0 или Д1. Нажимаем «Вычислить рейтинг» и получаем результат. Рассчитываются метрики RO, LCS2, L и их сумма, по которым можно определить наиболее подходящие кандидаты для топонима.

Для примера возьмем топоним «барда». Набор кандидатов следующий: бард, барда, бурда, брага, борода, брада, бразда, борозда, бурят, брат, брады, рада, нард, обада, обида. Вычислим рейтинг с моделью преобразования Д0. Нажимаем «вычислить рейтинг» и модуль выводит результаты (рис. 3.).

Результат (ранжирование):

Топоним: Барда
Модель: D0

# Кандидат	RO	LCS2	LEV	SUM
1. барда	1.000	1.000	1.000	3.000
2. бард	0.889	0.889	0.778	2.556
3. бурда	0.800	0.800	0.800	2.400
4. брада	1.000	0.800	0.600	2.400
5. бразда	0.909	0.727	0.636	2.273
6. обада	0.800	0.800	0.600	2.200
7. рада	0.889	0.667	0.556	2.111
8. борода	0.727	0.727	0.636	2.091
9. нард	0.667	0.667	0.556	1.889
10. борозда	0.667	0.667	0.500	1.833
11. брага	0.800	0.600	0.400	1.800
12. брады	0.800	0.600	0.400	1.800
13. брат	0.667	0.667	0.333	1.667
14. обида	0.600	0.600	0.400	1.600
15. бурят	0.400	0.400	0.400	1.200

Рис. 3. Результат работы модуля «Калькулятор лингвиста» на примере топонима «барда»

Верификация. Чтобы проверить устойчивость иерархического метода к искажениям слов-кандидатов, создадим «испорченные» наборы изначальных кандидатов. В таблице 2 описываются операции для преобразования. Наборы будут искажены на определенный процент (в нашем случае 10%, 20%, 30%, 40%, 50%). Все перечисленные операции будут комбинироваться при формировании «испорченных» кандидатов. Для каждого уровня шума будет 5 искаженных наборов.

Таблица 2. Операции для искажения кандидатов

Операция	Что делает	Пример	Лингвистический смысл
Замена буквы	Заменяет случайные буквы другими (обычно с сохранением длины)	Москва → Мшсква	Имитация ошибок распознавания
Удаление буквы	Удаляет одну или несколько букв в случайных местах	Самара → Смара	Потеря символов при сканировании
Вставка буквы	Добавляет лишние буквы	Казань → Казаньк	Имитация артефактов, ошибки автоматических конвертаций
Перестановка букв	Меняет местами буквы	Минск → Мискн	Типовая опечатка

В таблице 3 представлен пример искаженных слов кандидатов для топонима «Барда» при уровне шума 20%. Исходный набор слов кандидатов тот же.

Таблица 3. Примеры искаженных слов кандидатов

№	Кандидат								
1	бара	1	баря	1	кард	1	бард	1	брад
2	барда	2	бара	2	ураад	2	ъарда	2	барды
3	буида	3	урв	3	бруда	3	урда	3	аурда
4	рбаба	4	брыга	4	брага	4	брбга	4	браг
5	бородч	5	бурода	5	борода	5	борода	5	борода
6	брада	6	брад	6	брада	6	Бада	6	брада
7	бразд	7	бразда	7	бразда	7	бразда	7	бразда
8	корозйа	8	ороздь	8	оброзда	8	боодд	8	бороз
9	бурят	9	шурят	9	бубят	9	руяё	9	бурзт
10	браб	10	бпат	10	барж	10	брт	10	брат
11	ради	11	барды	11	брвгы	11	брады	11	мшады
12	радв	12	раа	12	юа	12	рада	12	жад
13	вард	13	над	13	над	13	урд	13	наро
14	баюа	14	чвада	14	обааа	14	биада	14	бада
15	обида	15	обдиа	15	обчда	15	онида	15	обдда

Результаты верификации иерархического метода на примере топонима «Барда» представлены в таблице 4 и на графике (рис. 4).

Таблица 4. Результаты верификации иерархического метода

Уровень шума	Средняя SUM без искажений	Средняя SUM с искажениями	Разница SUM (delta)	Относительное падение (delta / средняя SUM без искажений)
0	2,054613	2,054613	0	0
10		1,941892	0,112721	0,054862
20		1,701883	0,35273	0,171677
30		1,64276	0,411853	0,200453
40		1,464633	0,58998	0,287149
50		1,288574	0,766038	0,372838

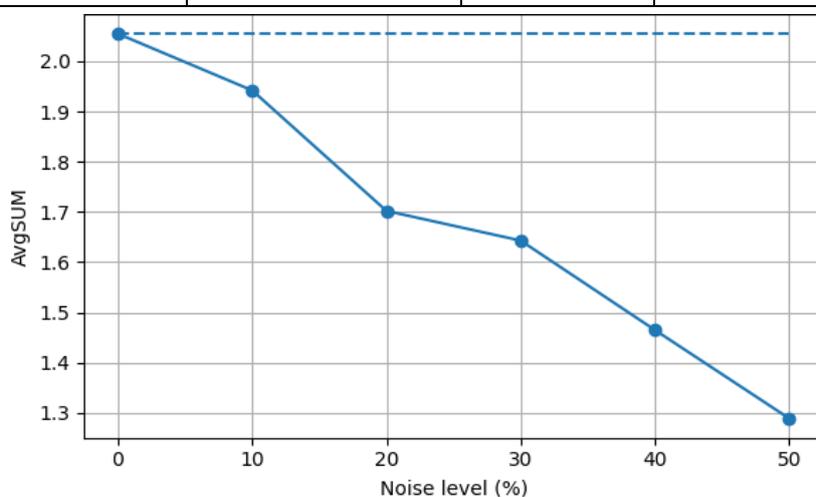


Рис. 4. График изменения средней суммы в зависимости от уровня шума

Результаты исследования следующие:

- При 10% шума падение средней суммы составляет всего 5,5% – метод устойчив к небольшим ошибкам;
- 30% шума – падение 20% – метод показал неплохой результат;
- 40% шума – падение 28% – метод показал неплохой результат;

Даже при 50% шума система не разваливается полностью, так как $SUM > 1.28$. Падение средней суммы – 37%.

Заключение. Разработана и апробирована программа «Калькулятор лингвиста», которая является модулем программы «Помощник лингвиста». Новизной выполненной работы является применение к анализу списка соответствий мультиметрического подхода и выстраивание рейтингов на основе метода анализа иерархий.

Реализованы следующие функции модуля:

- различные виды преобразования слов в консонантные классы;
- вычисление трех различных метрик, описывающих близость слов;
- выстраивание рейтинга слов соответствий на основе уменьшения суммы метрик;
- экспорт результатов вычислений в виде Excel-файла.

Выполнена верификация иерархического метода на устойчивость к искажениям. Алгоритм хорошо переносит шумы до 40%, даже при 50% качество установления соответствий снижается постепенно, без критического обвала.

Таким образом, данная программа поможет лингвистам в исследованиях, например, при нахождении скрытых лексических связей между двумя списками слов, что, в свою очередь, находит применение в изучении топонимики. Программа будет дополнена функцией определения заимствований в языках [11].

Список источников

1. Боровский А.В. Изучение связи между русским и бурятским языками методом матрицы мер близости между консонантными классами слов / А.В. Боровский, В.В. Братищенко, Е.Е. Раковская // *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2023. – Т. 5. – № 1. – С. 19–33.
2. Библиотека PyQt5 – URL: <https://doc.qt.io/qtforpython-5/> (дата обращения: 05.09.2025).
3. Язык программирования Питон – URL: <https://docs.python.org/3.12/> (дата обращения: 05.09.2025).
4. Рэтклифф Д.В. Сопоставление образцов: гештальтный подход / Д.В. Рэтклифф, Д.Э. Меценер // *Dr. Dobb's Journal*, 1988. – № 46. – С. 46.
5. Гасфилд Д. Алгоритмы на строках, деревьях и последовательностях: информатика и вычислительная биология / Д. Гасфилд. – Кембридж: Cambridge University Press, 1997. – С. 230–235.
6. Левенштейн В.И. Двоичные коды, способные исправлять удаления, вставки и обратные операции / В.И. Левенштейн // *Советская физика – Доклады*, 1966. – Т. 10, № 8. – С. 707–710.
7. Лещенко А. В. Практическое применение алгоритмов нечеткого поиска. Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93).
8. Библиотека openpyxl – URL: <https://openpyxl.readthedocs.io/> (дата обращения: 05.09.2025).
9. Matplotlib: Visualization with Python – URL: <https://matplotlib.org/stable/> (дата обращения: 05.09.2025).
10. Мосоркин Ф.Э. Разработка программы «Помощник лингвиста» // *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2025. – Т. 7, № 3. – С. 419–427. – DOI: 10.17150/2713-1734.2025.7(3).419-427. – EDN: ETGMWD.
11. Боровский А.В. Количественное определение заимствований в языке / А.В. Боровский, Е.Е. Раковская, Ф.Э. Мосоркин // *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2025. – Т. 7, № 3. – С. 333–345. – DOI: 10.17150/2713-1734.2025.7(3).333-345. – EDN: KZPAVO.

Боровский Андрей Викторович. Доктор физико-математических наук, профессор, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация. AuthorID: 22229, SPIN: 7243–8706. ORCID:0000-0003-2119-1072, andrei-borovskii@mail.ru.

Мосоркин Федот Эдуардович. Аспирант, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация. AuthorID: 1333242, SPIN: 7830-4843, mosorkin@bk.ru.

Вклад авторов

Боровскому А.В. принадлежит идея метода; Мосоркину Ф.Э. принадлежит разработка программного обеспечения и верификация метода

UDC 81.33

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.015

Development of the "Linguist's Calculator" program

Andrei V. Borovsky, Fedot E. Mosorkin

Baikal State University, Russia, Irkutsk, mosorkin@bk.ru

Abstract. This article describes the development of software for research in historical and mathematical linguistics that utilizes a multimetric approach and the analytic hierarchy process. The program is implemented as a desktop application in the Python programming language. The PyQt5 library was used to develop the graphical interface. Relevant mathematical methods for research in historical and mathematical linguistics are considered and implemented, including: transformations of A.D. Dolgopolsky's words into consonant classes, various word similarity metrics (taking into account the number of identical letters in two words (Ratcliff-Obershelp or RO), the number of letters in the longest common substring (LCS), and the number of elementary operations for combining words (Levenshtein distance or L)). The novelty of this work lies in the application of a multimetric approach to

the analysis of the list of correspondences and the construction of rankings based on the analytic hierarchy process. The "Linguist's Calculator" allows one to identify hidden lexical relationships between toponyms and lists of corresponding words, as well as conduct research into the origins of toponyms. The program has been tested on toponyms of the Irkutsk region with lost meanings and identifies the most likely matches among candidate words from various languages, including Evenki, Buryat, and Old Russian. The program supports input of a toponym and candidate words, selection of a word transformation model, and output and export of sorted results in descending order of metric sum to an Excel file. Verification procedures were conducted for the hierarchy analysis method in word multimetrics, using word sets that were specifically modified to test the method's robustness to word distortions. The study demonstrated that the algorithm is robust to distortions. With 50% noise, the quality of matching gradually declines. The algorithm's robustness to distortions makes it suitable for working with real (including distorted) toponyms. In the future, we plan to add functionality for quantitatively assessing borrowings in languages to expand its application in historical and mathematical linguistics for analyzing linguistic interactions and reconstructing the etymology of toponymy in the Irkutsk region.

Keywords: Historical and mathematical linguistics, software development, consonant classes, Ratcliffe-Obershelp pairwise metrics, LCS, Levenshtein distance

References

1. Borovsky A.V., Bratishchenko V.V., Rakovskaya E.E. Izucheniye svyazi mezhdu russkim i buryatskim yazykami metodom matritsy mer blizosti mezhdu konsonantnymi klassami slov [Study of the relationship between Russian and Buryat languages using the method of a proximity measure matrix between consonantal word classes]. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 19–33.
2. PyQt5 Library. Available at: <https://doc.qt.io/qtforpython-5/> (accessed: 09/05/2025).
3. Python Programming Language. Available at: <https://docs.python.org/3.12/> (accessed: 09/05/2025).
4. Ratcliff J.W., Metzener D.E. Pattern Matching: The Gestalt Approach. *Dr. Dobb's Journal*, 1988, no. 46, p. 46.
5. Gusfield D. Algorithms on Strings, Trees, and Sequences: Computer Science and Computational Biology. Cambridge, Cambridge University Press, 1997, pp. 230–235.
6. Levenshtein V.I. Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. *Soviet Physics – Doklady*, 1966, vol. 10, no. 8, pp. 707–710.
7. Leshchenko A.V. Prakticheskoye primeneniye algoritmov nechetkogo poiska [Practical application of fuzzy search algorithms]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU [Collection of Scientific Papers of NSTU]*, 2018, no. 3–4 (93).
8. openpyxl Library. Available at: <https://openpyxl.readthedocs.io/> (accessed: 09.05.2025).
9. Matplotlib: Visualization with Python. Available at: <https://matplotlib.org/stable/> (accessed: 09.05.2025).
10. Mosorkin F.E. Razrabotka programmy «Pomoshchnik lingvista» [Development of the "Linguist's Assistant" program]. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2025, vol. 7, no. 3, pp. 419–427, DOI: 10.17150/2713-1734.2025.7(3).419-427, EDN: ETGMWD.
11. Borovsky A.V., Rakovskaya E.E., Mosorkin F.E. Kolichestvennoye opredeleniye zaimstvovaniy v yazyke [Quantitative determination of borrowings in language]. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2025, vol. 7, no. 3, pp. 333–345, DOI: 10.17150/2713-1734.2025.7(3).333-345, EDN: KZPABO.

Borovsky Andrei Viktorovich. *D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, AuthorID: 22229, SPIN: 7243–8706. ORCID:0000-0003-2119-1072, andrei-borovskii@mail.ru,*

Mosorkin Fedot Eduardovich. *PhD Student, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation. AuthorID: 1333242, SPIN: 7830-4843, mosorkin@bk.ru.*

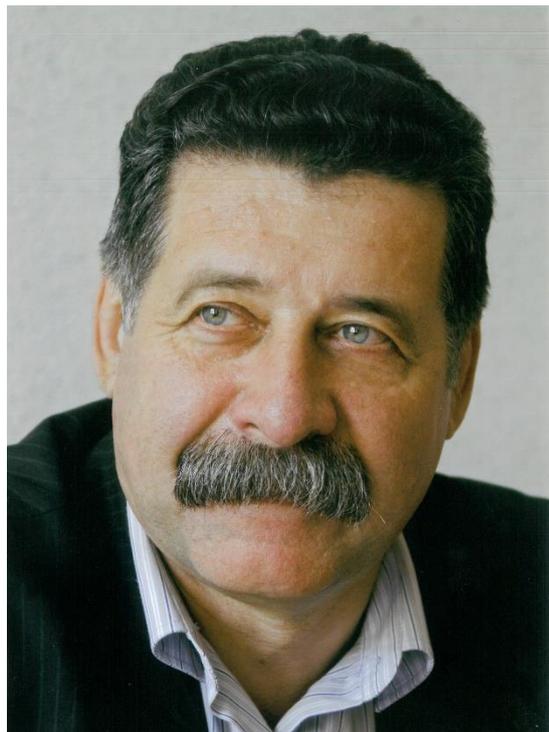
Contribution of the Authors

Borovsky A.V. belongs to the idea of the method; Mosorkin F.E. belongs to the development of software and method verification.

Статья поступила в редакцию 07.11.2025; одобрена после рецензирования 17.11.2025; принята к публикации 21.02.2026.

The article was submitted 11/07/2025; approved after reviewing 11/17/2025; accepted for publication 02/21/2026.

Памяти Бахвалова Сергея Владимировича



08.01.1958 - 21.02.2026

Ушел из жизни наш друг и коллега – 21 февраля 2026 г. на 69-ом году жизни, после продолжительной болезни, скончался Сергей Владимирович Бахвалов – Почетный работник сферы образования РФ, член-корреспондент Международной Академии науки и практики организации производства, кандидат технических наук, доцент центра программной инженерии Иркутского национального исследовательского технического университета.

Сергей Владимирович родился 8 января 1958 г. в Иркутске, в 1980 г. окончил Иркутский политехнический институт по специальности «Автоматизация технологического производства». В период обучения являлся секретарем комсомольской организации факультета. После окончания ВУЗа проходил стажировку и обучение в аспирантуре в Ленинградском электротехническом институте, где и защитил кандидатскую диссертацию.

Работал в Иркутском Политехническом институте с 1984 года. За время работы деканом (1986-1991 гг.) внёс большой вклад в развитие факультета: были открыты две новых специальности и внедрены в учебный процесс активные формы обучения. Долгое время, по 2020 г., заведовал кафедрой автоматизированных систем. Являлся организатором ряда научно-практических студенческих мероприятий, выступал в качестве эксперта в профессиональных конкурсах. Активно занимаясь учебно-методической и научно-исследовательской работой, он подготовил и опубликовал более 100 научных и методических работ. Готовил кадры высшей квалификации, являлся руководителем образовательной программы аспирантуры «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Под руководством Сергея Владимировича успешно защищены две кандидатские диссертации.

Он был руководителем и принимал участие в проектах по грантам РГНФ и других фондов, руководил НИР; активно участвовал в организации и проведении конференции «Винеровские чтения». С 1998 г. был одним из активных организаторов и участников нашей Всероссийской Байкальской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении».

Сергей Владимирович был не только высококвалифицированным специалистом, но и замечательным человеком, который оставил значимый след в сердцах друзей, студентов, коллег.

Выражаем глубокие соболезнования всем, кто знал и любил Сергея Владимировича. Пусть светлая память о нем живет в наших сердцах!

