

ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№2(38)/2025

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал
№ 2 (38)



EDITORIAL BOARD**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА**

Ablameyko S.V.	Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
Arshinskiy L.V.	Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Berestneva O.G.	Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ
Boukhanovsky A.V.	Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
Bychkov I.V.	Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Woern H.	Вёрен Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Voevodin V.V.	Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
Wolfengagen V.E.	Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
Gornov A.Y.	Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Gribova V.V.	Грибова В.В., чл.-корр. РАН, д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
Groumpos P.	Грумπος Π., Греция, University of Patras
Zorina T.G.	Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси
Kazakov A.L.	Казаков А.Л., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Kalimoldaev M.N.	Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
Karpenko A.P.	Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
Komendantova N.P.	Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, ПАСА
Kureichik V.V.	Курейчик В.В., д.т.н., профессор, Таганрог, ЮФУ
Lis R.	Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology
Marchenko M.A.	Марченко М.А. д.ф.-м.н., профессор РАН, Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН
Massel L.V.	Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Moskvichev V.V.	Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, ФИЦ ИВТ
Ovtcharova J.	Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Popov G.T.	Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
Sidorov D.N.	Сидоров Д.Н., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Smirnov S.V.	Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
Stennikov V.A.	Стенников В.А., академик РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Stylios C.	Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
Taratukhin V.V.	Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster
Khamisov O.V.	Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Hodashinsky I.A.	Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
Chubarov L.B.	Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ФИЦ ИВТ

EXECUTIVE EDITORIAL**ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА**

Chief Editor	Massel L.V.	Главный редактор	Массель Л.В.	д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor	Tuktartova P.A.	Редактор	Туктарова П.А.	к.э.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor	Gaskova D.A.	Редактор	Гаськова Д.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor	Massel A.G.	Редактор	Массель А.Г.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Tech. Editor	Popova M.D.	Техн. редактор	Попова М.Д.	Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Designer	Pesterev D.V.	Дизайнер	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»

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

*Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021 г.

Дата выхода 21.05.2025 г. Тираж 50 экз.

СС ВУ

© Издательство ИСЭМ СО РАН

Цена свободная (12+)

Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта

Абрамович Р.К., Добрынин В.Ю., Платонов А.В. Объединение глубоких моделей и разреженных представлений в поиске: обзор и анализ современных подходов 5

Сарин К.С. Адаптированный алгоритм градиентного спуска для настройки параметров нечеткого классификатора 18

Варламов О.О. Применение миварных технологий логического искусственного интеллекта для создания умных производственных систем 32

Математическое моделирование и его применение в научных исследованиях

Кузьмин А.Г. Численное моделирование колебательных режимов трансзвукового течения воздуха в изогнутом канале 47

Мальцев Н.Д., Полетайкин А.Н., Данилова Л.Ф. Модель выработки решений по организации профилактических ремонтов инфокоммуникационной техники на основе принципа единого ресурса 57

Краковский Ю.М., Киргизбаев В.П. Моделирующая программа для оценки финансового состояния денежного фонда с учетом отдельных работ по устранению инцидентов информационной безопасности 74

Каширская Е.Н. Планирование и обработка результатов экспериментов при шифровании 83

Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике

Баденко В.В., Козлов А.Н., Пензик М.В. Валидация CFD-модели реактора пиролиза с использованием данных термогравиметрического анализа и масс-спектрометрии 90

Безик Д.А., Бычкова Т.В. Определение параметров тепловой модели элементов Пельтье 103

Крюков А.В., Суслов К.В., Середкин Д.А., Воронина Е.В. Моделирование электромагнитных полей в тяговых сетях, оснащенных средствами повышения электромагнитной безопасности 113

Боровский А.В., Юменчук А.А. Теория случайных импульсов электрической нагрузки для жилого сектора 128

Цифровая экономика и управление

Черкашин А.К. Представительские функции в системах организационного управления: концептуальная метамодель 140

Бендик Н.В., Замараев А.О., Иваньо Я.М., Спесивцев А.В. Мониторинг данных об аграрном производстве для моделирования управленческих решений 158

Степанов М.А., Гергет О.М. Прогностическая модель оценки успешности обучения на основе метрической идентификации индивидуального образовательного маршрута 170

Информационные системы и технологии

Лисин В.А., Сидорова Е.А. Модель конструктора информационных порталов на основе онтологий предметной области и ресурсов 182

Климонов М.С., Федоров Р.К. Рекомендательная система для выбора сервисов на геопортале ИДСТУ СО РАН 199

Смирнова А.К., Янчус В.Э., Титов М.С., Юдин А.Н., Нургалеев Т.Р., Булычев Д.А., Михайлов И.А. Исследование восприятия образовательного ВЕБ-ресурса пользователями с применением технологии айтрекинга 208

	Content
Methods, technologies and applications of artificial intelligence	
Abramovich R.K., Dobrynin V.Yu., Platonov A.V. Combining deep language models and sparse vector representations in information retrieval: a review and analysis of modern approaches	5
Sarin K.S. Adapted gradient descent algorithm for tuning parameters of fuzzy classifier	18
Varlamov O.O. Application of mivar technologies of logical artificial intelligence for creation of smart manufacturing systems	32
Mathematical modeling and its application in scientific research	
Kuzmin A.G. Numerical simulation of oscillatory transonic airflow in a bent channel	47
Maltsev N.D., Poletaikin A.N., Danilova L.F. A Decision-making model for organizing preventive maintenance of infocommunication equipment based on the unified resource principle	57
Krakovskii Yu.M., Kirgizbaev V.P. Simulation program for assessing the financial health of a monetary fund accounting for specific information-security incident remediation activities	74
Kashirskaya E.N. Planning and processing of experimental results during grinding	83
Mathematical, information and intelligent technologies in energy	
Badenko V.V., Kozlov A.N., Penzik M.V. Validation of CFD model of pyrolysis reactor using thermogravimetric analysis and mass spectrometry data	90
Bezik D.A., Bychkova T.V. Determination of the parameters of the thermal model of Peltier elements	103
Kryukov A.V., Suslov K.V., Seredkin D.A., Voronina E.V. Modeling of electromagnetic fields in traction networks equipped with means of increasing electromagnetic safety	113
Borovskiy A.V., Yumenchuk A.A. Theory of random electrical load pulses for the residential sector	128
Digital economy and management	
Cherkashin A.K. Representative capacity in organizational management systems: a conceptual metamodel	140
Bendik N.V., Zamaraev A.O., Ivan'o Ya.M., Spesivtsev A.V. Monitoring data on agricultural production for modeling management decisions	158
Stepanov M.A. Gerget O.M. A predictive model for assessing learning success based on metric identification of an individual educational route	170
Information systems and technologies	
Lisin V.A., Sidorova E.A. Model of the information portal designer based on the ontologies of the subject area and resources	182
Klimonov M.S., Fedorov R.K. Recommender system for selecting services on the ISDCT SB RAS	199
Smirnova A.K., Yanchus V.E., Titov M.S., Yudin A.N., Nurgaleev T.R., Bulychev D.A. The study of the perception of an educational WEB-resource by users using eye tracking technology	208

Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта

УДК 004.912

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.001

Объединение глубоких моделей и разреженных представлений в информационном поиске: обзор и анализ современных подходов

Абрамович Роман Константинович, Добрынин Вячеслав Юрьевич,
Платонов Алексей Владимирович

Университет ИТМО,

Россия, Санкт-Петербург, asmetliness24237@gmail.com

Аннотация. Традиционные методы поиска, основанные на разреженных представлениях, характеризуются высокой производительностью, но ограниченным качеством в связи с неспособностью учитывать семантические связи в данных. С другой стороны, плотные векторные представления позволяют улучшить качество благодаря захвату семантических отношений в данных. Однако, эти методы сталкиваются с проблемами масштабируемости и требуют значительных вычислительных ресурсов. С развитием глубоких нейронных сетей, в том числе архитектур на основе трансформеров, появляется все больше работ, целью которых является объединить два подхода. Цель представленной обзорно-аналитической статьи – сравнить существующие работы, использующие глубокие модели для формирования разреженных представлений.

Ключевые слова: глубокие нейронные сети, семантический поиск, вычислительные ресурсы, разреженные представления, инвертированный индекс

Цитирование: Абрамович Р.К. Объединение глубоких моделей и разреженных представлений в информационном поиске: обзор и анализ современных подходов / Р.К. Абрамович, В.Ю. Добрынин, А.В. Платонов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2(38). – С. 5-17. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.001.

Введение. Современные поисковые системы функционируют по двухэтапной схеме (рис. 1). Задачей первого этапа является сканирование всего пространства документов и сокращение количества потенциальных кандидатов до десятков тысяч с помощью легковесных структур данных, таких, как обратный индекс. Обратным индексом называют структуру, в которой для каждого термина (токена) указывается список документов, где встречается данный термин, что позволяет быстро производить поиск. Он эффективен для быстрого поиска на огромных массивах данных, но обладает рядом недостатков. Поскольку индекс строится только на основе встречаемости отдельных терминов или n -грамм (последовательность из n элементов, в данном случае – терминов), он не способен уловить контекст и семантические отношения между словами, что снижает качество первичного ранжирования и приводит к проблеме несоответствия словарей запроса и документа. На втором и последующих этапах применяются более сложные и ресурсоемкие ре-ранжирующие модели, например, глубокие нейронные сети, основанные на архитектуре “Трансформер” [1], поскольку они позволяют учитывать глубокие контекстуальные связи в текстах, значительно улучшая качество ранжирования. Такие модели генерируют плотные векторные представления (dense embeddings), также называемые контекстуализированными представлениями/векторами. В отличие от традиционных разреженных векторов (где большинство координат равны нулю), плотные векторы содержат ненулевые значения во всех измерениях; кроме того, важным отличием является их размерность, которая на порядок ниже размерности разреженных векторов и позволяет компактно кодировать семантику. Эти векторы генерируются с использованием нейронных сетей, предварительно обученных на больших корпусах, и способны улавливать скрытые (контекстуальные) связи между словами, благодаря чему их применяют, чтобы преодолеть проблему несоответствия словарей между

запросом и документом, а также улучшить качество поиска за счет более глубокого учета смысла текста. Однако, разреженные представления и структуры данных, основанные на них (такие как обратный индекс), значительно превосходят плотные представления в скорости поиска, а также в требованиях к памяти.

При построении современных поисковых систем возникают несколько ключевых проблем. Во-первых, стремительный рост объемов данных вынуждает разработчиков заботиться о масштабировании и быстром доступе к информации, иначе сканирование десятков или сотен миллионов документов становится узким местом. Во-вторых, традиционные методики часто не учитывают контекст и могут отбрасывать синонимичные или грамматически изменённые формы слов, что приводит к неполному охвату релевантных результатов. В-третьих, точное сопоставление текстов усложняется из-за использования разных языков, терминологий и неоднозначностей в формулировках. Все эти сложности подталкивают к созданию гибридных решений, объединяющих преимущества разреженных индексов и контекстуализированных векторных моделей, где каждое слово представлено с учетом окружения.

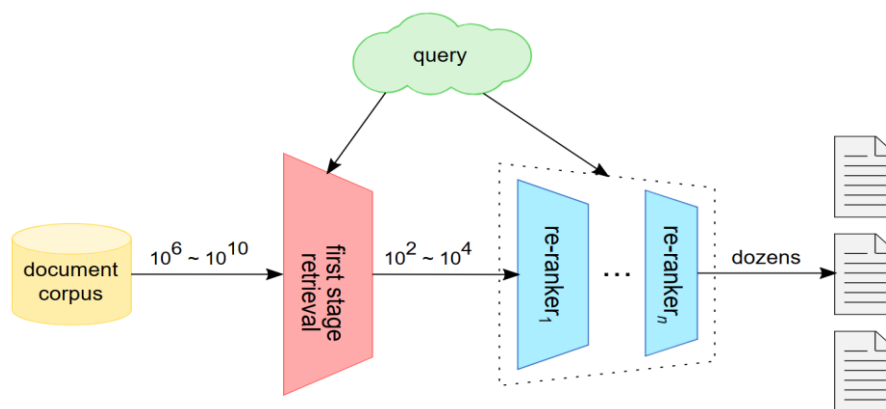


Рис. 1. Двухэтапная архитектура из легковесного первого этапа поиска (англ. first state retrieval) и последующего ре-ранжирования (англ. re-ranker), заимствовано из [2]

Недавние работы рассматривают возможность интеграции разреженных и плотных моделей в одной системе поиска, что может включать обучение глубоких моделей на генерацию разреженных векторов, трансформацию существующих плотных векторов в разреженные или использование плотных векторов для улучшения структуры обратного индекса уже на первом этапе. При таком подходе авторы пытаются объединить производительность традиционных разреженных моделей и глубокое понимание семантических связей плотных моделей, улучшая качество или производительность поиска.

Эффективность тех или иных методов оценки релевантности часто проверяется на крупных наборах данных. Одним из наиболее популярных является датасет MS MARCO, созданный компанией Microsoft и представляющий собой коллекцию пар «запрос – параграф», используемых при обучении и тестировании ранжирующих алгоритмов. На нем, как правило, рассчитывают метрику $MRR@10$ (Mean Reciprocal Rank). Данная метрика для каждого запроса находит первый релевантный документ в топ-10 результатах итоговой выборки, считает для данного документа его обратный ранг, после чего усредняет полученные значения для всех запросов. Таким образом, оценивается, насколько высоко система поднимает корректный ответ при ранжировании. Формула вычисления $MRR@10$ и обратного ранга представлена ниже:

$$MRR@10 = \frac{1}{|Q|} \sum_{i=1}^{|Q|} \frac{1}{r_i}$$

где Q - множество всех запросов, r_i - позиция первого релевантного документа для запроса i в итоговой топ 10 выборке (так, если релевантный документ был 3 по счету из 10, то его позиция будет равна 3), $\frac{1}{r_i}$ - обратный ранг первого релевантного документа для запроса i . Следует отметить, что если в топ-10 кандидатах не встретится ни одного релевантного документа, значение обратного ранга выставляется в 0.

В данной работе мы представляем обзор основных публикаций и методов, направленных на интеграцию этих подходов, рассматривая принципы их функционирования и результаты. Особое внимание уделяется рассмотрению возникающих при этом проблем: корректному учету контекста, оптимизации хранения и извлечения информации, что позволит глубже понять текущее состояние исследований и потенциальные векторы развития гибридных моделей поиска.

1. SNRM. Работа "From Neural Re-Ranking to Neural Ranking: Learning a Sparse Representation for Inverted Indexing" [3], представленная Хамедом Замани и соавторами в 2018 году, была одной из первых работ, предложивших модель ранжирования, объединяющую преимущества разреженных и плотных векторных представлений с сохранением эффективности поиска.

Модель SNRM (Standalone neural ranking model), представленная авторами, работает по принципу обучения модели генерировать разреженные векторные представления для запроса и документа, которые в дальнейшем могут быть использованы для построения и поиска по обратному индексу.

Представления запросов и документов генерируются с использованием глубоких нейронных сетей, при этом для кодирования как запроса, так и документа используется одна и та же архитектура с общими параметрами.

Для генерации разреженного представления документа эта модель сначала отдельно генерирует разреженные представления для каждой последовательной n -граммы токенов, после чего агрегирует их вместе, используя average pooling (усреднение значений в векторе по выбранным осям). В математическом виде процесс получения итогового вектора может быть выражен следующей формулой:

$$\psi(d) = \frac{1}{|d| - n + 1} \sum_{i=1}^{|d| - n + 1} \psi_{ngram}(t_i, t_{i+1}, \dots, t_{i+n-1}),$$

где d - документ, для которого генерируется вектор, $t_1, t_2, \dots, t_{|d|}$ - токены данного документа с сохранением порядка, ψ_{ngram} - полносвязная нейронная сеть, работающая по принципу, похожему на работу автокодировщика (autoencoder) [4], способного сжимать данные в компактное представление, а затем восстанавливать их. Однако, в отличие от классического автокодировщика, во время обучения модели авторы используют дополнительную функцию потерь в виде L1 регуляризации для разреживания итоговых векторов:

$$L_1(x) = \sum_{i=1}^{|x|} |x_i|$$

где x - вектор, подающийся на вход функции регуляризации, i - индекс элемента вектора x .

Использование такого подхода позволяет учесть длину входного документа и генерировать более разреженные представления для коротких документов и запросов, а также сохранить локальный контекст, в котором встречается каждый отдельный токен t_i .

За счет разреженности полученных векторов эта модель может быть эффективно использована для построения обратного индекса, что позволяет перейти к одноступенчатой архитектуре поиска.

Процесс построения обратного индекса данной модели строится на основе “скрытых” (англ. *latent*) токенов. Скрытые токены в контексте модели SNRM – это индексы компонентов итогового разреженного вектора, из чего следует, что количество скрытых токенов ограничено размерностью итогового вектора, т.е. если итоговый вектор будет размерности 5000, в обратном индексе будет 5000 скрытых токенов. Из этого также следует, что скрытые токены SNRM не совпадают напрямую с реальными токенами оригинального текста, что затрудняет их интерпретацию.

Сам же процесс индексации состоит в том, что каждый документ проходит через модель, получая разреженное представление данного документа. Затем, для каждого индекса данного векторного представления определяется: если i -ый элемент не равен нулю, значит, данный документ содержит скрытый токен i и должен быть добавлен в обратный индекс для этого токена. В качестве оценки релевантности при этом будет взято значение вектора по этому индексу.

Процесс поиска заключается в получении разреженного вектора для запроса, определения всех скрытых токенов (ненулевых компонент полученного вектора), находящихся в данном векторе, использовании обратного индекса для извлечения всех документов, содержащих скрытые токены запроса, и последующего вычисления релевантности. В качестве функции для оценки релевантности используется скалярное произведение между векторами запроса и документа.

Используя данный подход, авторам удалось добиться значительного улучшения качества поиска по сравнению с классическими методами ранжирования на обратном индексе, такими, как BM25 [5].

Однако, данная модель обладает рядом недостатков:

1. Потеря интерпретируемости токенов – поскольку для построения обратного индекса мы используем скрытые токены, полученные после генерации разреженного представления, мы не имеем возможности сопоставить их с оригинальным словарем и интерпретировать.
2. Потребность вычисления модели во время поиска – поскольку для обращения к обратному индексу в данной модели нам требуются скрытые токены запроса, запрос требуется пропускать через модель, что значительно повышает количество используемых ресурсов на этапе поиска по сравнению с BM25.
3. Статически заданное количество скрытых токенов – размерность результирующего разреженного вектора, генерируемого моделью, и, как следствие, количество скрытых токенов, доступных для использования в обратном индексе, жестко задается на этапе обучения модели, делая процесс его изменения труднореализуемым.

2. SparTerm. Еще одной значимой работой, имевшей значительное влияние на последующие исследования, стала работа "SparTerm: Learning Term-based Sparse Representation for Fast Text Retrieval" (SparTerm) [6], представленная Яном Байем и соавторами в 2020 году.

В своей работе авторы исследуют проблему улучшения традиционных разреженных представлений на основе терминов, используя глубокие языковые модели, такие, как BERT [7]. Модель SparTerm, представленная в работе, направлена на улучшение семантического соответствия оценок тематике документа в обратном индексе, сохраняя при этом преимущества эффективности, интерпретируемости и точного соответствия терминов.

Данная модель состоит из двух компонентов (рис. 2):

1. Предиктор важности (англ. *importance predictor*) – генерирует плотное векторное представление, отражающее семантическую важность для каждого термина в словаре,

основанное на контекстуальных представлениях, полученных с помощью предобученной языковой модели.

2. Контроллер активации (англ. gating controller) – создает бинарный массив той же размерности, что и векторное представление, определяющий, какие из элементов векторного представления попадут в итоговый разреженный вектор.

Контроллер активации при этом может иметь 2 режима работы:

1. Literal-only gating – в итоговое разреженное представление включаются только токены, которые изначально присутствовали в документе.
2. Expansion-enhanced gating – контроллер пытается дополнительно выполнить расширение запроса и документа, добавляя в них новые термины, близкие по смыслу тем, которые уже есть в документе.

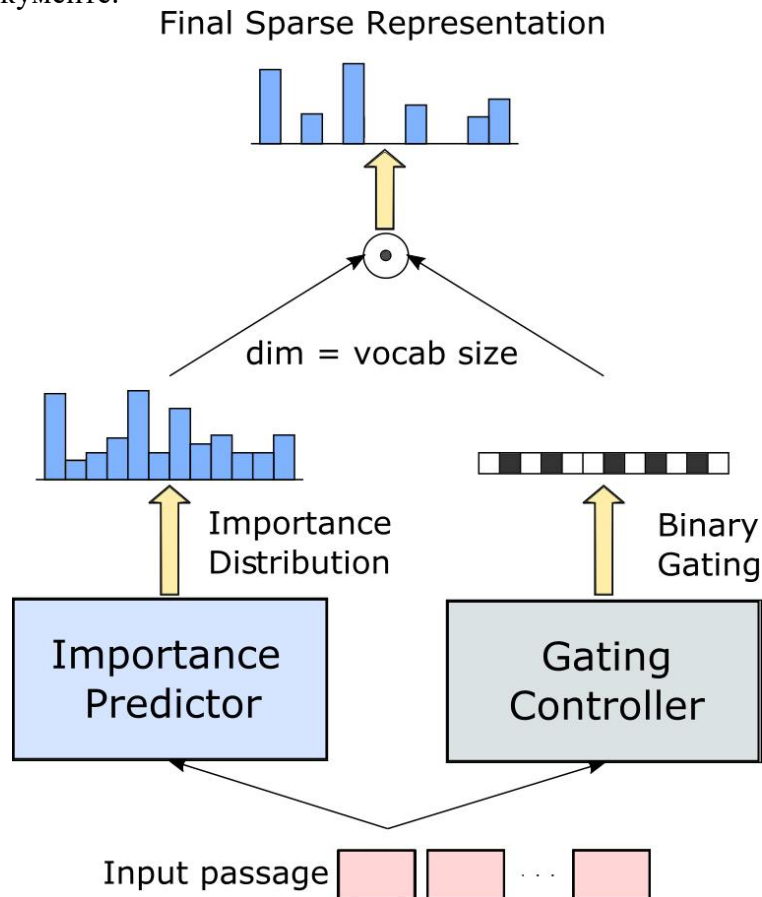


Рис. 2. Взаимодействие Предиктора Важности (англ. Importance Predictor) и Контроллера Активации (англ. Gating Controller) в архитектуре SparTern (заимствовано из [5])

Таким образом, помимо проблемы с потерей учета контекста, данная модель может решить проблему несовпадения словарей запроса и ответа.

Предсказатель важности использует BERT для получения контекстуализированных векторных представлений для каждого термина документа. Затем каждое векторное представление конкретного токена трансформируется в представление относительно всего словаря с использованием матричных трансформаций.

Так, для конкретного документа или последовательности токенов $t_1, t_2 \dots t_n$ и соответствующих им векторных представлений $h_1, h_2 \dots h_n$, полученных с помощью BERT, оценка важности w_{ij} каждого входного токена i относительно каждого токена в словаре j вычисляется по формуле:

$$w_{ij} = \text{Transform}(h_i)^T E_j + b,$$

где E_j – плотное представление токена j в словаре, полученное с помощью BERT, h_i – плотное векторное представление конкретного токена во входящем документе или последовательности, b – настраиваемый коэффициент смещения, Transform – линейный слой с активацией Gaussian Error Linear Unit [8] и слоем нормализации (англ. Layer Norm) [9].

Итоговое векторное представление $w = [w_0, w_1, \dots, w_n]$, где n – количество токенов в словаре, получается путем суммирования оценок важности каждого токена из словаря относительно токенов входящей последовательности после применения функции активации ReLU, обеспечивающей положительность весов терминов:

$$w_j = \sum_{i=0}^L ReLU(w_{ij}),$$

где $ReLU(x) = \max(0, x)$, w_j – итоговая оценка важности словарного токена j относительно входного документа, L – количество токенов входного документа.

Итоговое разреженное векторное представление, используемое для построения обратного индекса, определяется формулой:

$$p' = F(p) \odot G(p),$$

где $F(p)$ – плотный вектор, полученный предиктором важности, $G(p)$ – бинарный вектор, полученный контроллером активации, а символ $\odot$ означает покомпонентное (поэлементное) умножение соответствующих компонентов векторов.

На тестовых данных авторы получили значительный прирост качества по сравнению с классическими моделями: $MRR@10=0.29$ на датасете MS MARCO, по сравнению с $MRR@10=0.184$ у BM25.

Основным преимуществом данной модели по сравнению с похожими работами является полное сохранение исходных терминов, позволяющее сохранить свойство интерпретируемости результатов модели.

Ограничением же является то, что SparTerm с использованием expansion-enhanced gating не может быть обучена от начала до конца (end-to-end), то есть все её компоненты не оптимизируются совместно в рамках одного процесса обучения. Вместо этого один из её ключевых элементов — контроллер активации — обучается заранее и фиксируется во время обучения предиктора важности, что ограничивает возможности модели в адаптации к конкретной задаче. Это не позволяет модели изучить оптимальную стратегию разреженности — то есть самостоятельно определить, какие термины и в каком количестве должны участвовать в поиске, чтобы добиться наилучших результатов ранжирования в зависимости от конкретной задачи.

3. SPLADE. Развитием SparTerm является модель SPLADE [10], представленная Тибо Формалем и соавторами в 2021 году. Эта модель упрощает архитектуру SparTerm, убирая необходимость в использовании контроллера активации для разреживания итогового вектора.

Относительно модели SparTerm, основное изменение заключается в изменении логики расчета итоговой важности каждого токена в словаре относительно входного документа. За счет добавления эффекта логарифмической насыщенности авторам удастся предотвратить доминирование отдельных терминов и обеспечить разреженность итогового вектора без использования отдельного контроллера активации.

Итоговая формула расчета важности каждого токена в словаре при новом подходе выглядит следующим образом:

$$w_j = \sum_{i \in t} \log(1 + ReLU(w_{ij})),$$

где $ReLU(x) = \max(0, x)$, w_{ij} – оценка важности токена словаря j относительно токена входного документа i , w_j – итоговая оценка важности токена словаря j относительно всего документа.

Помимо эффекта логарифмической насыщенности, разреженность итоговых векторов обеспечивается дополнительной функцией потерь при обучении модели, по аналогии с работой SNRM. Однако, в качестве функции потерь авторы SPLADE использовали FLOPS [11] регуляризатор, понижающий количество вычислений с плавающей точкой, необходимое для вычисления вектора документа. По результатам тестов, использование FLOPS позволяет строить более сбалансированный, и, как следствие, более эффективный поисковый индекс.

Благодаря пересмотру архитектуры, авторам удалось добиться $MRR@10=0.322$ на датасете MS MARCO, улучшив итоговое качество поиска по сравнению со SparTerm ($MRR@10=0.29$ на тестовых данных).

4. ColBERT, ColBERTv2. В отличие от ранее рассмотренных работ авторы ColBERT [12] не пытаются генерировать разреженные представления для построения индекса и ускорения поиска. Вместо этого авторы используют ряд алгоритмических оптимизаций для сокращения количества ресурсов, необходимых для осуществления процесса поиска.

Основными подходами к оптимизации при этом являются: использование методов приближенного поиска соседей (ANN) с использованием библиотеки faiss [13], позволяющей значительно ускорить поиск схожих векторов на больших объемах данных; PQ-преобразования [14] для сжатия векторных представлений и сокращения потребляемой памяти; использование введенной авторами концепции «позднее взаимодействие» (англ. late interaction), позволяющей отделить процесс получения контекстных векторов запросов и документов от расчета оценки релевантности между ними.

PQ-преобразование (product quantization) - метод сжатия с потерями, используемый для сжатия плотных векторных представлений. Данный метод разбивает исходный вектор на заданное количество под-векторов как представлено на рисунке 3. Затем, под-векторы, находящиеся на одинаковых позициях в оригинальных векторах (например, под-вектора на позиции 3) кластеризуются друг с другом, в результате чего, для каждой позиции подвектора получается набор центроидов - векторов, находящихся ровно в середине рассматриваемых кластеров. Далее, каждый под-вектор в оригинальном векторе заменяется на индекс ближайшего к нему центроида. Полученные сжатые векторы, в которых под-векторы заменены на индексы центроидов под-векторных кластеров, занимают значительно меньше памяти и могут быть использованы чтобы приблизительно восстановить оригинальный вектор путем обратной замены индекса на центроид.

Оригинальный вектор

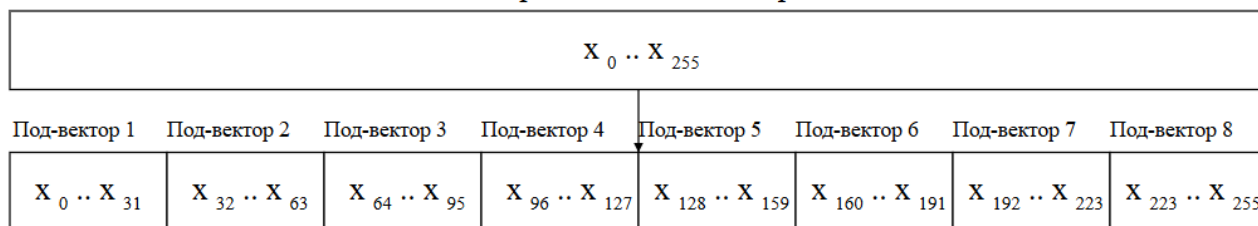


Рис. 3. Разбиение на подвектора для PQ

Использование позднего взаимодействия позволяет вынести в оффлайн процесс индексирования документов путем получения для них векторного представления, его сжатия с использованием PQ и сохранения в векторный индекс faiss для последующего поиска.

Процесс обработки запроса состоит из нескольких этапов. Сначала, для каждого входного токена запроса вычисляется множество его контекстуализированных векторов E_q . Далее, для каждого полученного вектора параллельно отправляется запрос в векторный индекс faiss для извлечения векторных представлений заранее проиндексированных документов кандидатов.

Финальным этапом является расчет итоговой оценки релевантности всех документов, найденных в векторном индексе, с запросом пользователя. Итоговая оценка при этом рассчитывается с использованием определенной авторами функцией MaxSim, которая выполняет попарное сравнение схожести каждого векторного представления запроса и документа, и выбирает максимум:

$$S_{q,d} := \sum_{i \in [E_q], j \in [E_d]} \max(E_{q_i} \cdot E_{d_j}^T),$$

где E_q – множество контекстуализированных векторов запроса, E_d – множество контекстуализированных векторов документа, q_i – контекстуализированный вектор запроса под индексом i из множества E_q , d_j – контекстуализированный вектор документа под индексом j из множества E_d , $S_{q,d}$ – итоговая оценка релевантности между запросом q и документом d . Данный процесс представлен на рис. 4:

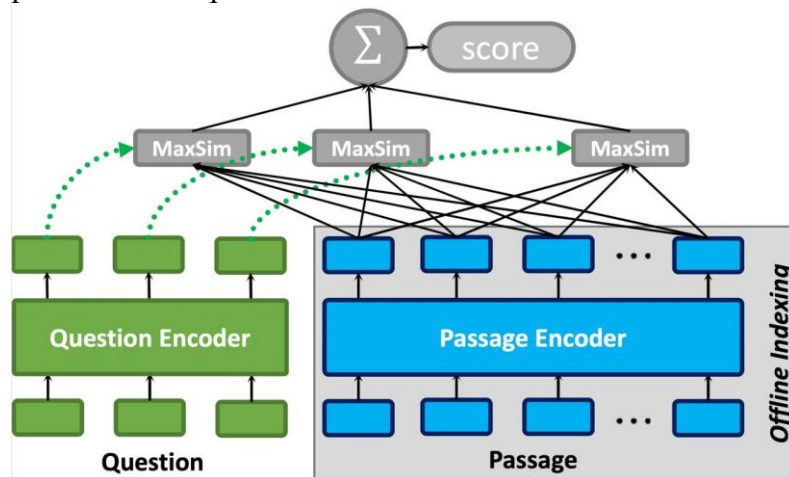


Рис. 4. Оценка релевантности (англ. score) между запросом (англ. question) и документом (англ. passage) с использованием функции MaxSim (заимствовано из [11])

Эта модель показывает высокое качества поиска ($MRR@10=0.36$ по сравнению с 0.184 у BM25 на датасете MS MARCO), однако требует намного больше ресурсов для вычисления оценки релевантности между документом и запросом, а также требует большего дискового пространства для хранения векторных представлений документов.

В дальнейшем авторы этого подхода развивают свою идею в модели ColBERTv2 [15], внедряя новую, улучшенную схему кодирования векторов, работающую в несколько этапов. На первом этапе происходит кластеризация индексируемых векторов, в результате которой получается заданное количество векторных кластеров. Далее, для каждого кластера вычисляется центроид – вектор, находящийся ровно в середине рассматриваемого кластера, при этом каждому центроиду присваивается порядковый индекс. Следующим шагом, для каждого индексируемого вектора вычисляется остаточный (англ. residual) вектор r , представляющий из себя разность вектора и ближайшего к нему центроиду:

$$r = v - C_t$$

где v – индексируемый вектор, C_t – ближайший центроид к этому вектору.

Далее, остаточные вектора r сжимаются с использованием PQ-преобразования для сокращения занимаемой памяти, группируются по индексу центроида C , использованного для получения остаточного вектора, и сохраняются на диск вместе с самими центроидами.

Благодаря такому подходу размер хранимых векторов сокращается с 256 байт до 20 или 36 байт в зависимости от настроек PQ, что значительно снижает количество потребляемой памяти. Более того, хранение векторов в разрезе центроидов, к которым они принадлежат, позволяет дополнительно сократить время поиска, поскольку позволяет сразу отбросить

вектора и центроиды далекие от векторов входного запроса. При этом, для оценки релевантности во время поиска, оригинальные вектора восстанавливаются по формуле:

$$\underline{v} = C_t + \underline{r}$$

где $\underline{v}$ - приближенное восстановленное значение оригинального вектора, $\underline{r}$ - сжатый через PQ остаточный вектор, C_t - центроид, использованный для получения остаточного вектора.

Новая схема кодирования остатков позволяет эффективно сжать векторы без изменения архитектуры самой модели или ее обучения, сохраняя при этом высокую точность поиска: $MRR@10 = 0.397$ на датасете MS MARCO.

Однако, несмотря на сокращение требуемого объема памяти для хранения векторов и оптимизации в виде поиска только в ближайших центроидов, вторая версия модели все еще страдает от необходимости проведения тяжелых вычислительных операций на этапе поиска для получения векторного представления запроса и поиска по векторному индексу.

5. SparseEmbed. Модель SparseEmbed [16], представленная в 2023 году, является комбинацией идей моделей SPLADE и ColBERT. Эта модель работает в 2 этапа. На первом этапе, с использованием в качестве основы модели SPLADE, для документа генерируется разреженный вектор размерностью словаря, а также сохраняются плотные векторы для каждого токена документа или запроса.

На втором этапе, используя плотные векторы активированных токенов в качестве весов внимания (attention scores) - параметров глубокой нейронной сети, которые отражают важность каждого токена и позволяют более точно учитывать контекст и значимость отдельных терминов при генерации векторных представлений для поиска релевантных документов, на базе запроса или документа генерируются плотные векторные представления для всех активированных токенов разреженного вектора (результата первого этапа).

Таким образом, данная модель не использует разреженный вектор напрямую для поиска или для построения обратного индекса. Вместо этого разреженный вектор служит индикатором, для каких терминов из словаря следует сгенерировать плотный вектор для оценки релевантности. Данный подход представлен на рис. 5:

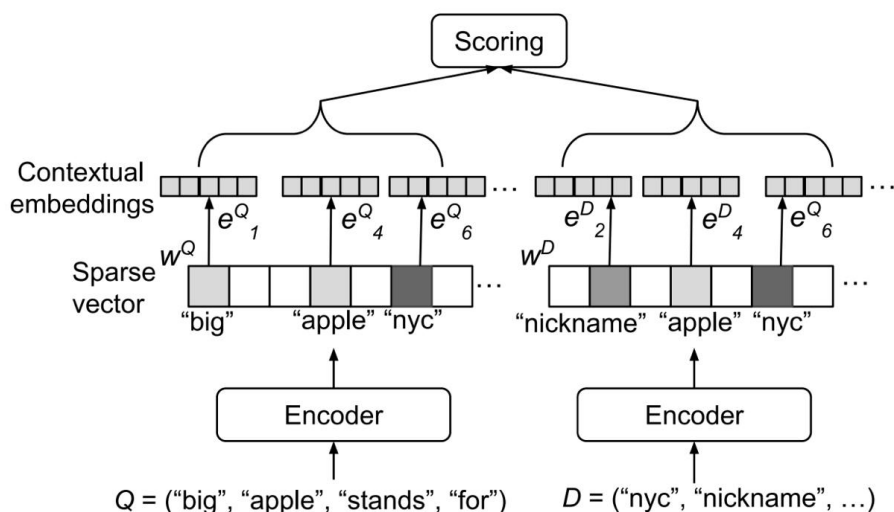


Рис. 5. Использование разреженных векторов (англ. sparse vector) и контекстуализированных векторов (англ. contextualized embeddings) для расчета релевантности в модели SparseEmbed (заимствовано из [15])

В качестве оценки релевантности используется сумма векторных произведений плотных векторов терминов, совпадающих в запросе и документе:

$$s(q, d) = \sum_{(i,j) \in I^q \times I^d, i=j} (e_i^q)^T e_j^d,$$

где индексы q и d – сравниваемые запрос и документ, e_i^q и e_j^d – плотные представления пересекающихся активированных терминов, для которых выполняется скалярное произведение, I^q и I^d – множество активированных (присутствующих как в запросе, так и в документе) терминов запроса и документа.

Преимуществом данной модели по сравнению с SPLADE является более точный захват контекста за счет использования плотных векторных представлений. По сравнению с ColBERT, оценка релевантности SparseEmbed является более производительной, поскольку требует линейного времени относительно количества активированных терминов, тогда как ColBERT требует квадратичного времени для сравнения всех векторов запроса и документа между собой.

Авторы работы получили оценку качества в 0.392 для датасета MS MARCO, лишь незначительно уступая ColBERTv2 на тех же данных (0.397).

Однако, данная модель также страдает от необходимости вычислять контекстуализированные векторные представления на этапе поиска, значительно увеличивая количество необходимых ресурсов.

Заключение. Исследования в области информационного поиска, направленные на объединение разреженных и плотных представлений, продолжают оставаться актуальными. Современные глубокие модели, такие, как трансформеры, значительно улучшили качество поиска за счет возможности захвата семантических отношений между терминами. Тем не менее, эти модели сталкиваются с проблемами масштабируемости и требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение в реальных системах, а модели на основе разреженных представлений страдают от отсутствия учета контекста и, как следствие, низкого качества ранжирования. Рассмотренные в статье модели, такие, как SNRM, SparTerm, SPLADE и другие, демонстрируют различные подходы к интеграции разреженных и плотных представлений. SNRM предлагает генерировать разреженные представления с использованием глубоких нейронных сетей, позволяя использовать обратные индексы для эффективного поиска. SparTerm и SPLADE улучшают этот подход, вводя более сложные механизмы оценки важности терминов и расширения запросов, что позволяет лучше учитывать семантические связи. Модель SPLADE, в частности, представляет значительное улучшение по сравнению с предыдущими подходами, используя логарифмическое насыщение и разреженную регуляризацию для достижения высокой эффективности, и качества поиска.

В статье авторы выполнили аналитический обзор основных исследований в области гибридных (разреженно-плотных) моделей, рассмотрев их ключевые принципы, проблемы и результаты на тестовых наборах данных. Особое внимание уделялось учету контекста, оптимизации хранения и извлечения информации, что позволило глубже проанализировать текущее состояние исследований. Анализ показал, что все рассмотренные подходы (SNRM, SparTerm, SPLADE и др.) способны сочетать высокое качество ранжирования с частичной сохранностью скорости поиска, свойственной разреженным структурам. Однако остаются нерешенными задачи по дальнейшему повышению масштабируемости, а также по преодолению барьера вычислительной сложности, вызванного необходимостью обучения и применения плотных моделей.

Среди перспективных векторов развития гибридных моделей можно выделить:

- 1) разреживание уже обученных плотных моделей с целью их более эффективной интеграции в обратный индекс;
- 2) выделение кластеров векторных представлений токенов для более точного обучения словаря и оптимизации хранения векторных представлений;

- 3) динамическое изменение (адаптивный выбор) размерности разреженных векторов в зависимости от задач и ресурсов;
- 4) развитие методов гибридной индексации, учитывающих контекст на всех этапах поиска.

Таким образом, главным результатом выполненного аналитического обзора является систематизация существующих направлений в интеграции разреженных и плотных представлений, и демонстрация того, что при грамотном сочетании этих подходов можно достичь высокой точности поиска без критичного снижения производительности. Интеграция разреженных и плотных представлений в информационном поиске представляет собой перспективное направление исследований, которое потенциально может значительно улучшить качество и эффективность поисковых систем.

Список источников

1. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., et al. Attention is all you need, arXiv (Cornell University), 2017, vol. 30, pp. 5998-6008, DOI:10.48550/arXiv.1706.03762.
2. Guo J., Cai Y., Fan Y., Sun F., et al. Semantic models for the first-stage retrieval: A comprehensive review. ACM Transactions on Information Systems, 2022, 40(4), pp. 1-42, DOI:10.1145/3486250
3. Zamani H., Dehghani M., Croft W.B., et al. From neural re-ranking to neural ranking: Learning a sparse representation for inverted indexing, The 27th ACM International Conference on Information and Knowledge Management, 2018, pp. 497-506.
4. Bank D., Koenigstein N., Giryas R. Autoencoders. Deep learning in science, 2021.
5. Robertson S. E., Zaragoza H. The probabilistic relevance framework: BM25 and beyond, Found. Trends Inf. Retr., 2009, vol. 3, pp. 333-389.
6. Bai Y., Li X., Wang G., Zhang C. et al. SparTerm: Learning term-based sparse representation for fast text retrieval, arXiv, 2020.
7. Devlin J., Chang M. W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv, 2018, DOI:10.48550/arXiv.1810.04805.
8. Hendrycks D., Gimpel K. Gaussian Error Linear Units (GELUs). arXiv, 2016, DOI:10.48550/arXiv.1606.08415.
9. Ba Jimmy L., Kiros Jamie Ryan, Hinton Geoffrey E. Layer normalization. arXiv, 2016, DOI:10.48550/arXiv.1607.06450.
10. Formal T., Piwowarski B., Clinchant S. SPLADE: Sparse lexical and expansion model for first stage ranking, Proceedings of the 44th International ACM SIGIR Conference on research and development in information retrieval, 2021.
11. Biswajit Paria, Chih-Kuan Yeh, Ian E. H. Yen, et al. Minimizing FLOPs to Learn Efficient Sparse Representations. arXiv, 2020, DOI:10.48550/arXiv.2004.05665.
12. Khattab O., Zaharia M.A. ColBERT: Efficient and effective passage search via contextualized late interaction over BERT, Proceedings of the 43rd International ACM SIGIR Conference on research and development in information retrieval, 2020.
13. Johnson J., Douze M., Jégou H. Billion-scale similarity search with GPUs. IEEE Transactions on Big Data, 2017, vol. 7, pp. 535-547, DOI:10.48550/arXiv.1702.08734.
14. Jégou H., Douze M., Schmid C. Product quantization for nearest neighbor search. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2011, vol. 33, pp. 117-128, DOI:10.1109/TPAMI.2010.57.
15. Santhanam K., Khattab O., Saad-Falcon J., et al. ColBERTv2: Effective and efficient retrieval via lightweight late interaction. North American chapter of the association for computational linguistics, 2021, DOI:10.48550/arXiv.2112.01488.
16. Kong W., Dudek J.M., Li C., et al. SparseEmbed: Learning sparse lexical representations with contextual embeddings for retrieval. Proceedings of the 46th International ACM SIGIR conference on research and development in information retrieval, 2023.

Абрамович Роман Константинович. Аспирант, факультет программной инженерии и компьютерной техники университета ИТМО. AuthorID: 1253076, SPIN: 8710-8245, Scopus AuthorID: 58759320100, ORCID: 0009-0005-5397-2772, asmetliness24237@gmail.com, 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр. 49.

Добрынин Вячеслав Юрьевич. Аспирант, факультет программной инженерии и компьютерной техники университета ИТМО. AuthorID: 1014269, SPIN: 9792-5868, Scopus AuthorID: 57223099701, ORCID: 0009-0004-3056-8403, vidobrynin@itmo.ru, 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр. 49.

UDC 004.912

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.001

Combining deep language models and sparse vector representations in information retrieval: a review and analysis of modern approaches

Roman K. Abramovich, Viacheslav Yu. Dobrynin, Alexey V. Platonov

ITMO university,

Russia, St. Petersburg, *asmetliness24237@gmail.com*

Abstract. Traditional search methods based on sparse vector representations are characterized by high efficiency but limited quality due to their inability to capture semantic relationships in the data. On the other hand, dense vector representations can improve quality by capturing semantic relationships. However, these methods face scalability issues and require significant computational resources. With the development of deep neural networks, including transformer-based architectures, there is a growing interest in combining these two approaches. The purpose of this review paper is to review existing works that use deep models to generate sparse representations.

Keywords: deep neural networks, semantic search, computational resources, sparse representations, inverted index

References

1. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., et al. Attention is all you need, arXiv (Cornell University), 2017, vol. 30, pp. 5998-6008, DOI:10.48550/arXiv.1706.03762.
2. Guo J., Cai Y., Fan Y., Sun F. et al. Semantic models for the first-stage retrieval: A comprehensive review. ACM Transactions on Information Systems, 2022, 40(4), pp. 1-42, DOI:10.1145/3486250
3. Zamani H., Dehghani M., Croft W.B., et al. From neural re-ranking to neural ranking: Learning a sparse representation for inverted indexing, The 27th ACM International Conference on Information and Knowledge Management, 2018, pp. 497-506.
4. Bank D., Koenigstein N., Giryas R. Autoencoders. Deep learning in science, 2021.
5. Robertson S. E., Zaragoza H. The probabilistic relevance framework: BM25 and beyond, Found. Trends Inf. Retr., 2009, vol. 3, pp. 333-389.
6. Bai Y., Li X., Wang G., Zhang C. et al. SparTerm: Learning term-based sparse representation for fast text retrieval, arXiv:, 2020.
7. Devlin J., Chang M. W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv, 2018, DOI:10.48550/arXiv.1810.04805.
8. Hendrycks D., Gimpel K. Gaussian Error Linear Units (GELUs). arXiv, 2016, DOI:10.48550/arXiv.1606.08415.
9. Ba Jimmy L., Kiros Jamie Ryan, Hinton Geoffrey E. Layer normalization. arXiv, 2016, DOI:10.48550/arXiv.1607.06450.
10. Formal T., Piwowarski B., Clinchant S. SPLADE: Sparse lexical and expansion model for first stage ranking, Proceedings of the 44th International ACM SIGIR Conference on research and development in information retrieval, 2021.
11. Biswajit Paria, Chih-Kuan Yeh, Ian E. H. Yen, et al. Minimizing FLOPs to Learn Efficient Sparse Representations. arXiv, 2020, DOI:10.48550/arXiv.2004.05665.
12. Khattab O., Zaharia M.A. ColBERT: Efficient and effective passage search via contextualized late interaction over BERT, Proceedings of the 43rd International ACM SIGIR Conference on research and development in information retrieval, 2020.
13. Johnson J., Douze M., Jégou H. Billion-scale similarity search with GPUs. IEEE Transactions on Big Data, 2017, vol. 7, pp. 535-547, DOI:10.48550/arXiv.1702.08734.
14. Jégou H., Douze M., Schmid C. Product quantization for nearest neighbor search. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2011, vol. 33, pp. 117-128, DOI:10.1109/TPAMI.2010.57.

15. Santhanam K., Khattab O., Saad-Falcon J., et al. ColBERTv2: Effective and efficient retrieval via lightweight late interaction. North American chapter of the association for computational linguistics, 2021, DOI:10.48550/arXiv.2112.01488.
16. Kong W., Dudek J.M., Li C., et al. SparseEmbed: Learning sparse lexical representations with contextual embeddings for retrieval. Proceedings of the 46th International ACM SIGIR conference on research and development in information retrieval, 2023.

Abramovich Roman Konstantinovich. PhD student, Faculty of software engineering and computer science, ITMO university. SPIN: 8710-8245, AuthorID: 1253076, Scopus AuthorID: 58759320100, ORCID: 0009-0005-5397-2772,, asmetliness24237@gmail.com, 197101, Russia, Saint Petersburg, Kronverksky pr. 49.

Dobrynin Viacheslav Yurievich. PhD student, Faculty of software engineering and computer science, ITMO university. SPIN: 9792-5868, AuthorID: 1014269, Scopus AuthorID: 57223099701, ORCID: 0009-0004-3056-8403, vidobrynin@itmo.ru, 197101, Russia, Saint Petersburg, Kronverksky pr. 49.

Platonov Alexey Vladimirovich. Associate Professor, Ph.D., Faculty of software engineering and computer science, ITMO university. SPIN: 1973-7334, AuthorID: 1048089, Scopus AuthorID: 57197736275, ORCID: 0000-0002-8485-1296, avplatonov@itmo.ru, 197101, Russia, Saint Petersburg, Kronverksky pr. 49.

Статья поступила в редакцию 09.07.2024; одобрена после рецензирования 20.03.2025; принята к публикации 11.04.2025.

The article was submitted 07/09/2024; approved after reviewing 03/20/2025; accepted for publication 04/11/2025.

Адаптированный алгоритм градиентного спуска для настройки параметров нечеткого классификатора

Сарин Константин Сергеевич

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, Томск, sarin.konstantin@mail.ru

Аннотация. Использование систем искусственного интеллекта для критически важных сфер жизнедеятельности человека требует доверия к полученному системой результату. Важным для обеспечения доверия является объяснение полученного решения. Нечеткие системы обладают свойством объяснимости благодаря наличию базы продукционных правил на естественном языке. Настоящая работа посвящена модификации алгоритма градиентного спуска для настройки параметров нечетких классификаторов. Эксперименты на 38 наборах данных показали, что применение алгоритма для классификаторов, построенных метаэвристическим алгоритмом, статистически значимо увеличивает точность классификации.

Ключевые слова: нечеткие системы, классификация, анализ данных, алгоритмы оптимизации

Цитирование: Сарин К.С. Адаптированный алгоритм градиентного спуска для настройки параметров нечеткого классификатора / К.С. Сарин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2 (38). – С. 18-31. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.002.

Введение. Системы искусственного интеллекта (СИИ) нашли широкое применение во многих сферах жизнедеятельности человека, в том числе и таких критически важных, как здравоохранение, энергетика и оборона [1]. Поскольку решения, принимаемые такими системами, влияют на жизни людей, появляется необходимость понимания того, как были получены такие решения [2, 3]. Отсутствие такой возможности может повлиять на уровень доверия человека к результатам решений этой системы и может вызвать опасения по поводу причинения вреда для себя и общества в целом [4, 5]. Это может замедлить общественное принятие и внедрение СИИ. В Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 года, утвержденной указом Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490 (ред. от 15.02.2024), отмечается, что отсутствие понимания того, как искусственный интеллект достигает результатов, является одной из причин низкого уровня доверия к современным технологиям искусственного интеллекта и может стать препятствием для их развития.

Решение указанной выше проблемы предлагается осуществлять с помощью объяснимого искусственного интеллекта (ОИИ). СИИ обладает свойством объяснимости, если способна предоставлять доказательства или обоснование человеку в поддержку своего решения [6, 7]. Взаимодействие человека и СИИ играет ключевую роль в ОИИ. Полученные системой знания должны использоваться для предоставления объяснений; кроме того, пользователи должны иметь возможность оспаривать и задавать вопросы системам, чтобы понять обоснование решения в соответствии со своими конкретными потребностями [8].

В последние годы произошел рост систем поддержки принятия решений, основанных на нейронных сетях глубокого обучения. Эмпирический успех моделей глубокого обучения обусловлен сочетанием эффективных алгоритмов обучения и их огромного параметрического пространства, которое может включать сотни слоев и миллионы параметров [9]. Это является причиной того, что такие СИИ рассматриваются, как сложные модели «черного ящика» [10], исключающие прозрачность или поиск понимания механизма, с помощью которого работает модель [11].

Нечеткие системы имеют большой потенциал в разработке решений ОИИ. Благодаря наличию базы нечетких правил они способны выражать знания в ориентированной на

человека форме, используя термины естественного языка [12]. Такая возможность позволяет предоставить понятные объяснения используемых системой знаний, а также детали, касающиеся процесса вывода при принятии решений [13]. С помощью теории нечеткой логики, лежащей в основе таких систем, была установлена связь между числовыми решениями и правилами на естественном языке. Таким образом, численные операции, осуществляющие процедуру принятия решения в нечетких системах, интерпретируются логическими рассуждениями во вполне понятной человеку лингвистической форме. Это побудило использовать нечеткие методы для разработки ОИИ [14].

Нечеткие классификаторы являются нечеткими системами, осуществляющими процесс классификации или нахождения класса объекта по значениям его признаков [15]. Продукционные правила таких систем связывают значения признаков объекта, представленных в лингвистической форме, с их классом. Построение нечетких классификаторов на основе анализа данных методами машинного обучения рассматривается, как проблема оптимизации или поиска [16], поэтому для их построения применяются алгоритмы оптимизации. Детерминированные алгоритмы оптимизации применялись для настройки параметров нечетких аппроксиматоров. Алгоритм градиентного спуска применялся для настройки параметров адаптивных нейро-нечетких систем вывода (ANFIS), основанных на моделях Такаги-Сугено и используемых для решения задач аппроксимации [17]. Данные системы также применялись и для классификации, но их объяснимость для человека весьма затруднительна, поскольку консеквентная часть нечетких правил таких систем содержит не метку класса объекта, а линейную функцию от значений входных признаков [18-20]. Для построения нечетких классификаторов широко применялись эвристические методы оптимизации, основанные на эволюционных и роевых метаэвристических алгоритмах [16, 21-23].

Предпочтение в выборе метаэвристических алгоритмов для построения нечетких классификаторов заключается в их способности осуществлять поиск глобального оптимума, в отличие от детерминированных, которые сосредоточены на локальном поиске. Также данные алгоритмы не требуют анализа целевой функции и ее дифференцируемости, что является затруднительным для нечетких классификаторов. Фактически целевая функция представляется «черным ящиком», для которого определяются только входные и выходные значения [24], но в детерминированных алгоритмах, основанных на дифференцировании, точность поиска локального оптимума в окрестности заданной точки значительно выше. Поэтому комбинированный поиск на основе метаэвристического и детерминированного алгоритмов потенциально может повысить эффективность поиска глобального оптимума.

В настоящей работе предлагается адаптировать алгоритм градиентного спуска для настройки параметров нечетких классификаторов и применить его после построения классификаторов метаэвристическим алгоритмом. Исходные значения параметров, найденные с помощью метаэвристики, могут быть улучшены более точным локальным поиском градиентного спуска. Такое дообучение параметров классификаторов может повысить точность их прогнозов.

Цель настоящей работы заключается в повышении точности нечетких классификаторов, построенных метаэвристическими алгоритмами, с помощью применения адаптированного алгоритма градиентного спуска для настройки их параметров.

Основной научный вклад представлен следующими результатами.

1. Адаптирован алгоритм градиентного спуска для настройки параметров функций принадлежности нечетких классификаторов.

2. Эмпирически доказана эффективность предложенного алгоритма при построении классификаторов на 38 наборах данных из различных предметных областей. Статистический тест Уилкоксона показал значимое повышение точности классификации после применения алгоритма к классификаторам, построенным метаэвристическим алгоритмом смешанной многокритериальной оптимизации.

Остальная часть статьи организована следующим образом. В п.2 рассмотрены архитектура нечеткого классификатора и его построение на основе анализа данных с помощью алгоритма смешанной многокритериальной оптимизации. Предложен адаптированный алгоритм градиентного спуска для настройки параметров. В п.3 описана экспериментальная часть исследования для оценки эффективности предлагаемого алгоритма. В заключении сделаны выводы о проделанной работе.

2. Построение нечеткого классификатора. Согласно каноническому описанию, представленному Дудой и Хартом [15], классификатор – это устройство, определяющее класс объекта $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ среди множества классов $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M\}$ посредством системы разделяющих функций $g_k(\mathbf{x})$, $k = 1, \dots, M$. Каждая функция связана с конкретным классом и возвращает значение, которое характеризует степень уверенности в том, что объект принадлежит данному классу. Для того, чтобы определить класс объекта, вычисляются значения разделяющих функций. Классом объекта является класс функции с максимальным значением.

Предположим, что имеется m обучающих (т.е. с известным классом) образцов данных $\mathbf{x}_p = (x_{p1}, \dots, x_{pn})$, $p = 1, 2, \dots, m$.

Каждый образец принадлежит одному из M классов $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M\}$ в n -мерном пространстве признаков, где x_{pi} – значение i -й переменной p -го образца ($i = 1, \dots, n$). В настоящем разделе представлены алгоритмы, которые на основе обучающих образцов данных осуществляют построение нечеткого классификатора. По своей сути, нечеткий классификатор – это математическая модель на основе теории нечеткой логики, определяющая зависимость между значениями признаков объекта и его классом.

2.1. Архитектура нечеткого классификатора. Архитектура нечеткого классификатора, используемого в работе, впервые предложена в [25] и впоследствии нашла широкое применение во многих исследованиях. Нечеткий классификатор состоит из продукционных правил «ЕСЛИ-ТО» с нечеткими терминами в антецедентной части, оценивающими значения признаков образца, и метками классов в консеквентной части, определяющими его класс:

Правило R_j : ЕСЛИ $x_1 = A_{1j}$ И ... И $x_n = A_{nj}$ ТО class = c_j , $j = 1, \dots, R$,

где R – количество правил; $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор входных переменных, соответствующий признакам классифицируемого образца $\mathbf{x}$; A_{ij} – нечёткий термин, характеризующий i -ю переменную в j -ом правиле ($i = 1, \dots, n$); c_j – метка класса в правиле.

Формализация нечетких терминов осуществляется с помощью функций принадлежности, т.е. с каждым термином A_{ij} ассоциируется функция принадлежности $\mu_{ij}(x_i)$, определенная на множестве значений x_i . В работе использовались функции принадлежности гауссова типа, содержащие два параметра: среднее значение c и стандартное отклонение σ :

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}.$$

Если заданы база правил и функции принадлежности, соответствующие нечетким терминам в правилах, то определение класса нового образца $\mathbf{x}$ среди классов $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M\}$ осуществляется с помощью процедуры нечеткого вывода. В выводе для логической операции И используется t -норма в виде произведения, а агрегация правил проводится суммированием.

На основе этих операций вычисляются значения разделяющих функций образца для каждого класса:

$$g_k(\mathbf{x}) = \sum_{\substack{j=1,\dots,R, \\ c_j=\omega_k}} \prod_{i=1}^n \mu_{ij}(x_i), \quad (1)$$

где $k = 1, \dots, M$. Затем определяется класс образца, который соответствует классу разделяющей функции с максимальным значением:

$$\mathbf{x} \in \omega_k, k = \arg \max_{k=1,\dots,M} (g_k(\mathbf{x})).$$

2.2. Построение классификатора метаэвристическим алгоритмом. В исследовании нечеткий классификатор создается с помощью алгоритма смешанной многокритериальной оптимизации «кукушкин поиск» с генетическим оператором скрещивания [26]. Этот алгоритм показал высокую эффективность на комплексных оценках сходимости и многообразия и позволяет проводить поиск в смешанном дискретно-непрерывном пространстве, в котором присутствуют как дискретные, так и вещественные переменные.

Перед построением классификатора необходимо задать количество лингвистических терминов, связанных с каждой переменной, а также функции принадлежности, соответствующие этим терминам. Для повышения уровня интерпретируемости, предлагается использовать равномерное разбиение каждой переменной на нечеткие множества и при построении классификатора осуществлять малые изменения параметров функций принадлежности. В [27] для функций принадлежности равномерного разбиения вводится параметр α для бокового смещения функции. Значение «1» данного параметра соответствует увеличению среднего значения на величину, соответствующую расстоянию между центрами соседних функций принадлежности равномерного разбиения. В настоящей работе помимо бокового смещения предлагается использовать смещение охвата β для изменения среднеквадратичного отклонения. Допустим, что пространство признака равномерно разбито на H нечетких множеств. Значение «1» данного параметра соответствует увеличению среднеквадратичного отклонения на величину, равную разности между значениями среднеквадратичных отклонений функций принадлежности при разбиении на $H-1$ и H нечетких множеств. Чтобы получить значения параметров функций принадлежности с учетом введенных смещений, необходимо провести следующие преобразования:

$$s_{ij} = \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{H-1} (j-1 + \alpha_{ij}), \sigma_{ij} = \frac{(x_i^{\max} - x_i^{\min})}{3(H-1)} \left(1 + \frac{\beta_{ij}}{H} \right), \quad (2)$$

где s_{ij} , b_{ij} – среднее значение и среднеквадратичное отклонение функции принадлежности i -й переменной j -го термина; α_{ij} , β_{ij} – соответствующие боковое смещение и смещение охвата.

Параметры α и β при малых значениях инициируют малые сдвиги, что не существенно отражается на потере интерпретируемости. В настоящей работе оба смещения изменяются в диапазоне $[-0,3, 0,3]$. С помощью выражений (2) они преобразуются в параметры функции принадлежности. На рисунке 1 показано равномерное разбиение переменной на три нечетких термина «Малое», «Большое» и «Среднее», а также боковые смещения функции принадлежности нечеткого множества «Среднее» для $\alpha = -0,3$ и $\alpha = 0,3$ и смещения охвата для $\beta = -0,3$ и $\beta = 0,3$. Для того, чтобы повысить интерпретируемость, крайние слева и справа функции равномерного разбиения не имеют бокового смещения, а только смещение охвата. Таким образом, при разбиении на три нечетких множества боковое смещение при построении классификатора будет иметь только функция принадлежности термина «Среднее».

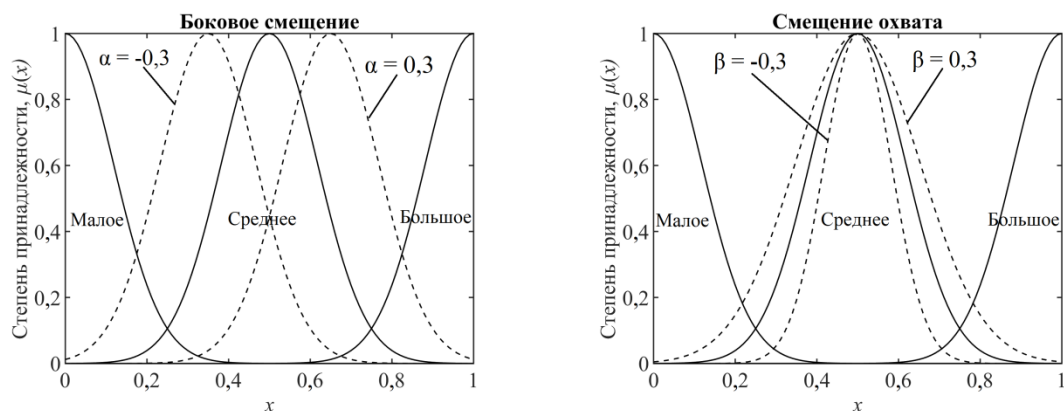


Рис. 1. Функции принадлежности с боковым смещением и смещением охвата

С помощью метаэвристического алгоритма смешанной многокритериальной оптимизации осуществляется построение классификатора. Целочисленная часть вектора решений алгоритма кодирует antecedentную часть базы правил классификатора путем сопоставления переменной номера нечеткого термина, образованного равномерным разбиением. Вещественная часть содержит боковое смещение и смещение охвата для функций принадлежности каждого термина разбиения. Консеквентная часть правила, определяющая класс, не присутствует в векторе поиска, поскольку может быть вычислена на основе функций принадлежности antecedentной части и обучающих образцов данных с помощью эвристики, предложенной в [28, 29]. В качестве целевых значений оптимизации используются показатель точности – процент правильно классифицированных образцов – и показатели интерпретируемости – количество правил и общее количество терминов в базе правил. Поскольку алгоритм возвращает множество классификаторов, образующих недоминируемые по Парето решения, из этого множества выбирается классификатор с лучшей точностью на валидационной выборке.

2.3. Адаптированный алгоритм градиентного спуска. Задача алгоритма градиентного спуска заключается в нахождении параметров функций принадлежности, увеличивающих точность классификации. Обычно точность классификации оценивается с помощью показателей, не пригодных для дифференцирования, например, таких, как процент правильно классифицированных образцов или f-мера. Применение градиентных методов оптимизации, в том числе и алгоритма градиентного спуска, требует дифференцируемость целевой функции. Для нахождения параметров нейронных сетей с помощью варианта алгоритма градиентного спуска, называемого обратным распространением ошибки, в качестве целевой функции обычно используют сумму квадратов отклонений значений разделяющих функций и их ожидаемых значений. Эта функция должна быть минимизирована:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^m \sum_{k=1}^M (g_k(\mathbf{x}_p) - y_{pk})^2, \quad (3)$$

где $\mathbf{x}_p = (x_{p1}, \dots, x_{pn})$ – p -й образец обучающих данных, y_{pk} – ожидаемое значение разделяющей функции k -го класса для p -го образца. Если образец принадлежит классу ω_h , т.е. $\mathbf{x}_p \in \omega_h$, то ожидаемые значения разделяющих функций данного образца определяются следующим образом:

$$y_{pk} = \begin{cases} 1, & \text{если } k = h \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, k = 1, \dots, M.$$

Множитель $1/2$ в (3) используется для того, чтобы избавиться от множителя 2 после дифференцирования функции, на значение оптимального решения он не влияет.

Использование целевой функции (3) для нахождения параметров нечеткого классификатора сталкивается со следующей проблемой. В результате агрегации правил значение g_k может быть больше 1, хотя ожидаемые значения ограничены диапазоном $[0, 1]$. Чтобы избавиться от вышеприведенной проблемы при нахождении параметров нечеткого классификатора, предлагается изменить целевую функцию оптимизации с помощью нормирования значений разделяющих функций путем деления на их сумму:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^m \sum_{k=1}^M \left(\frac{g_k(\mathbf{x}_p)}{\sum_{k=1}^M g_k(\mathbf{x}_p)} - y_{pk} \right)^2. \quad (4)$$

В таком случае они будут ограничены диапазоном $[0, 1]$.

Основой метода градиентного спуска является понятие градиента целевой функции. Градиент представляет собой вектор частных производных функции по ее переменным и показывает направление в сторону ее наискорейшего возрастания. Далее будут найдены формулы для вычисления частных производных по параметрам s и σ классификатора. Применяя правила дифференцирования сложной, степенной и дробной функции по параметру b к (3), получается следующее значение частной производной:

$$E'_b = \sum_{p=1}^m \sum_{k=1}^M \left(\left(\frac{g_k(\mathbf{x}_p)}{\sum_{k=1}^M g_k(\mathbf{x}_p)} - y_{pk} \right) \frac{g'_{kb}(\mathbf{x}_p) \left(\sum_{k=1}^M g_k(\mathbf{x}_p) \right) - \left(\sum_{k=1}^M g'_{kb}(\mathbf{x}_p) \right) g_k(\mathbf{x}_p)}{\left(\sum_{k=1}^M g_k(\mathbf{x}_p) \right)^2} \right). \quad (5)$$

Чтобы рассчитать данное значение, необходимо вычислить значения производных разделяющих функций g'_{kb} , где $k = 1, \dots, M$. Для этого обозначим множество номеров правил k -го класса, содержащих в antecedентной части функцию принадлежности с параметром b , как R^b_k , а номер соответствующей переменной в правиле как d . Значение производной разделяющей функции по параметру среднего s функции принадлежности согласно (1) определяется следующим образом:

$$g'_{ks}(\mathbf{x}_p) = \left(\sum_{\substack{j=1, \dots, R, \\ c_j = a_k}}^n \prod_{i=1}^n \mu_{ij}(x_{pi}) \right)'_s = \frac{x_{pd} - s}{\sigma^2} \sum_{j \in R^s_k} \prod_{i=1}^n e^{-\frac{(x_{pi} - s_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}} \quad (6)$$

Аналогично находится производная по параметру среднеквадратичного отклонения σ :

$$g'_{k\sigma}(\mathbf{x}_p) = \frac{(x_{pd} - s)^2}{\sigma^3} \sum_{j \in R^s_k} \prod_{i=1}^n e^{-\frac{(x_{pi} - s_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}} = \frac{x_{pd} - s}{\sigma} g'_{ks}(\mathbf{x}_p) \quad (7)$$

Блок-схема алгоритма градиентного спуска для оптимизации параметров нечеткого классификатора представлена на рисунке 2. Обозначим параметры вектором $\mathbf{P} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, каждый элемент которого представляет параметры среднего значения или среднеквадратичного отклонения функций принадлежности. Для поиска минимума целевой функции E (5) необходимо изменять параметры нечеткого классификатора в направлении, противоположном направлению градиента, причем при изменении параметры не должны выйти за границы их значений. Границы являются параметрами алгоритма и задаются до выполнения его работы. На блок-схеме верхняя граница обозначена вектором

$$\mathbf{U} = (U_1, U_2, \dots, U_n), \text{ а нижняя – вектором } \mathbf{L} = [L_1, L_2, \dots, L_n].$$

Используя преобразование (2), нижние границы α и β в значении $-0,3$, а верхние – в $0,3$, можно получить нижние и верхние границы изменения параметров функций принадлежности.

Если параметры выходят за границы требуемого диапазона, то принимают граничные значения. Сам спуск является итерационным процессом, в котором $\mathbf{P}$ изменяется следующим образом:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P} - h \nabla E(\mathbf{P}), \quad (8)$$

где h – длина шага в направлении спуска, $\nabla E(\mathbf{P}) = (E'_{p_1}(\mathbf{P}), E'_{p_2}(\mathbf{P}), \dots, E'_{p_n}(\mathbf{P}))$ – градиент, элементы которого вычисляются согласно (5), (6) и (7). Длина шага в предлагаемом алгоритме выбирается методом дробления, т.е. итерации с преобразованиями (8) проводятся до тех пор, пока функция E убывает и не уменьшается точность классификации $\text{acc}(\mathbf{P})$, определяющая процент правильно классифицированных образцов обучающих данных. Если убывание прекращается или точность уменьшается, то шаг h уменьшается вдвое, вычисляются параметры $\mathbf{P}$ с новым шагом и снова проверяется условие. Дробление шага продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие. Итерационный процесс прекращается по достижению длины шага h минимального допустимого значения e , которое задается до выполнения работы алгоритма.

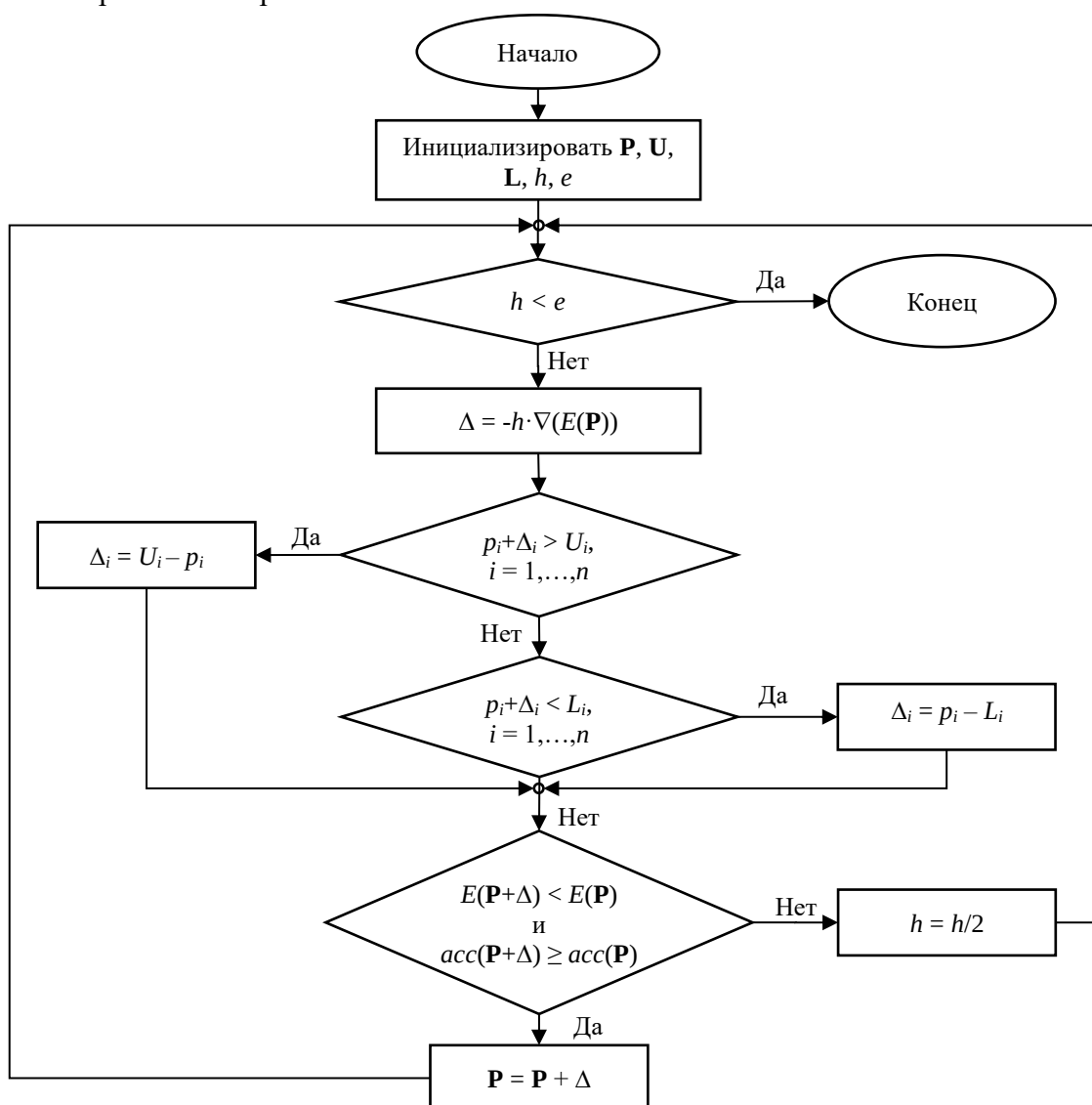


Рис. 2. Блок-схема алгоритма градиентного спуска

3. Эксперимент. Для оценки эффективности работы предлагаемого алгоритма настройки параметров, проведен эксперимент по построению нечетких классификаторов на общедоступных наборах. Настройка параметров градиентным спуском проводилась после

построения классификаторов алгоритмом смешанной многокритериальной оптимизации. Параметры алгоритмов указаны в таблице 1. Для улучшения интерпретируемости в алгоритме смешанной многокритериальной оптимизации генерировались правила, не содержащие больше трех лингвистических терминов, и пространство каждой переменной разбивалось на три нечетких множества. Нижние и верхние границы изменения параметров функций принадлежности L и U рассчитывались согласно (2), исходя из диапазона изменений $[-0,3, 0,3]$ бокового смещения α и смещения охвата β .

Таблица 1. Параметры алгоритмов построения

Алгоритм	Название параметра	Значение параметра
Смешанная многокритериальная оптимизация [26]	Размер популяции	100
	Число итераций	5000
	Вероятность удаления гнезда p_a	0,05
	Коэффициент прыжка полетов Леви γ	Равномерно уменьшался с 0,4 до 0,05
Градиентный спуск	Минимальная длина шага e	$1 \cdot 10^{-8}$
	Начальное значение шага h	0,1
	Диапазон изменения смещений α и β	$[-0,3, 0,3]$

3.1. Методика проведения эксперимента и результаты. Программная реализация осуществлялась на языке MATLAB в среде программирования MATLAB R2022b. Эксперимент проводился на персональном компьютере под управлением операционной системы Windows 10 с 8 Гб оперативной памяти и процессором Intel Core i7-12700.

Для экспериментов были использованы 38 наборов данных из репозитория KEEL (<http://keel.es>). Количество признаков в наборах варьируется от 2 до 90; количество образцов от 80 до 19020; количество классов от 2 до 15. Три набора являются синтетическими, т.е. специально разработанными для проверки эффективности классификаторов, остальные собраны из реальных проблемных областей.

Эксперимент проводился по схеме 10-кратной перекрестной проверки и соответствовал методике, приведенной в [29]. Для каждого из 10 разбиений набора данных запуск алгоритмов осуществлялся три раза. Таким образом, критерий эффективности оценивался средним значением по тридцати запускам алгоритма на каждом наборе данных. В качестве критерия эффективности применялся показатель точности – процент правильно классифицированных образцов. В таблице 2 приведены значения точности в ходе проведения эксперимента. В столбцах MI указана точность классификаторов, построенных метаэвристическим алгоритмом, а в столбцах GD указана точность классификаторов, дообученных градиентным спуском.

3.2. Обсуждение результатов и выводы. Для того, чтобы оценить значимость различий критериев эффективности при построении классификаторов, применяют статистический анализ, в частности, непараметрические тесты [30-32]. Для парных сравнений результатов эксперимента использовался тест знаковых рангов Уилкоксона, который основан на вычислении разности между показателями эффективности. Установлен уровень значимости $\alpha = 0,05$. Нулевая гипотеза H_0 говорит об отсутствии статистической разницы в результатах точности классификаторов от их дообучения алгоритмом градиентного спуска. Альтернативная гипотеза H_1 говорит об обратном. Результаты теста приведены в таблице 3. Суммарное количество отрицательных рангов оказалось больше положительных, а значение p -value оказалось меньше критического $\alpha = 0,05$. Таким образом, можно утверждать, что применение адаптированного алгоритма градиентного спуска для настройки параметров нечетких классификаторов, построенных алгоритмом смешанной многокритериальной

оптимизации «кукушкин поиск» с генетическим оператором скрещивания, показало статистически значимое увеличение точности классификации.

Таблица 2. Результаты точности классификации (%)

№	Набор данных	MI	GD	№	Набор данных	MI	GD
1	appendicitis	85,58	85,06	20	newthyroid	94,41	94,73
2	australian	85,60	86,09	21	page-blocks	94,72	94,85
3	balance	90,66	91,25	22	phoneme	79,21	79,35
4	banana	76,31	80,27	23	pima	75,92	76,23
5	bands	68,11	67,63	24	ring	92,69	92,80
6	cleveland	55,69	56,62	25	satimage	82,85	83,19
7	contraceptive	53,95	54,11	26	sonar	73,94	75,90
8	dermatology	92,55	94,03	27	spambase	89,91	89,99
9	ecoli	77,58	80,18	28	spectfheart	78,18	78,95
10	glass	64,44	65,03	29	tae	52,83	52,83
11	haberman	71,45	74,04	30	thyroid	94,30	94,30
12	hayes-roth	78,33	79,79	31	titanic	78,69	78,82
13	heart	82,72	83,33	32	twonorm	94,04	94,08
14	hepatitis	86,71	85,98	33	vehicle	66,20	67,66
15	ionosphere	91,37	91,28	34	vowel	42,56	43,94
16	iris	95,78	96,44	35	wdbc	96,08	96,31
17	magic	82,65	83,22	36	wine	94,53	96,24
18	mammographic	83,45	84,33	37	wisconsin	96,12	96,07
19	movement_libras	45,56	50,00	38	yeast	53,94	54,56

Таблица 3. Статистическое сравнение точности классификации

Сравнение алгоритмов	Сумма рангов		p-value	Гипотеза Н ₀ ($\alpha=0,05$)
	+	–		
MI и GD	75,5	590,5	<0,001	Отвергается

Для демонстрации свойства объяснимости нечетких классификаторов на рисунке 3 приведена база правил одного из вариантов построения для набора данных sonar.

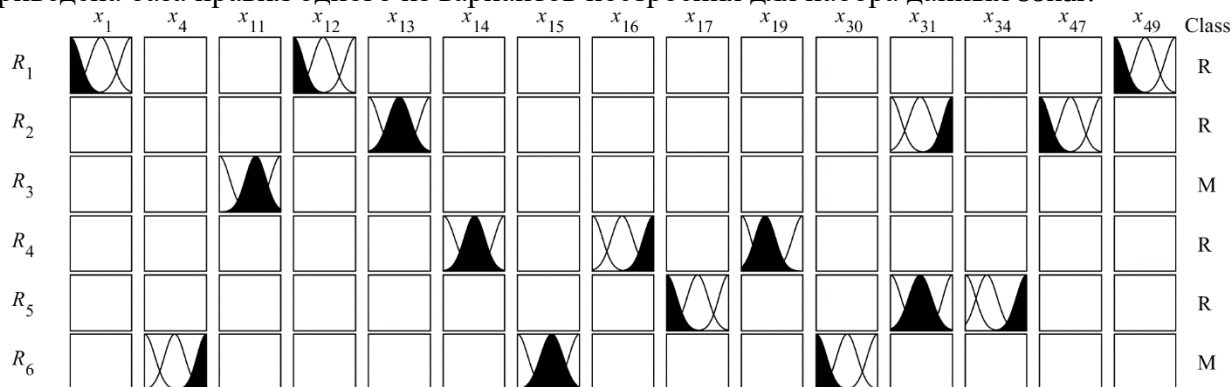


Рис. 3. Графическое представление базы правил нечеткого классификатора

Набор содержит 60 признаков, являющихся сигналами гидролокатора, и 208 образцов. Задачей классификации является определение по признакам гидролокатора, является обнаруженный объект камнем (R) или миной (M). Получены 6 правил ($R_1, R_2, \dots, R_6$). В конце каждого правила указано значение его класса (R или M), в столбцах размещены переменные. Как можно заметить, не все переменные задействованы в классификаторе. Приведены значения функций принадлежности для лингвистических терминов «Маленькое», «Среднее», «Большое». Функция принадлежности выбранного в правиле термина выделена заливкой. База правил на естественном языке представлена ниже.

- R_1 : ЕСЛИ x_1 Малое И x_{12} Малое И x_{49} Малое ТО объект является КАМНЕМ
 R_2 : ЕСЛИ x_{13} Среднее И x_{31} Большое И x_{47} Малое ТО объект является КАМНЕМ
 R_3 : ЕСЛИ x_{11} Среднее ТО объект является МИНОЙ
 R_4 : ЕСЛИ x_{14} Среднее И x_{16} Большое И x_{19} Среднее ТО объект является КАМНЕМ
 R_5 : ЕСЛИ x_{17} Малое И x_{31} Среднее И x_{34} Большое ТО объект является КАМНЕМ
 R_6 : ЕСЛИ x_4 Большое И x_{15} Среднее И x_{30} Малое ТО объект является МИНОЙ

Заключение. Для обеспечения доверия к системам искусственного интеллекта необходимо предоставлять доказательство или обоснования к результатам их решений. Такое требование делает актуальной разработку прогностических моделей на основе нечетких систем. Построение нечетких классификаторов сосредоточено на применении метаэвристических алгоритмов оптимизации, благодаря способности находить глобальный оптимум, работать в режиме «черного ящика» и обеспечивать поиск в дискретном и непрерывном пространстве. Предложенный адаптированный алгоритм градиентного спуска для настройки параметров функций принадлежности позволил статистически значимо улучшить точность классификации после построения метаэвристическим алгоритмом. Это осуществилось благодаря способности градиентного спуска точнее находить локальные оптимумы. Таким образом, применение комбинации метаэвристических и градиентных методов оптимизации обеспечивает увеличение точности прогнозов моделей на основе нечетких систем.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность Илье Александровичу Ходашинскому, профессору Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, за обсуждение настоящего исследования и ряда ценных советов и замечаний. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00168, <https://rscf.ru/project/24-21-00168/>.

Список источников

1. Wiese T. Predictive maintenance using Artificial Intelligence in critical infrastructure: a decision-making framework. International journal of engineering, business and management, 2024, vol. 8, no 4, pp. 1-4, DOI: 10.22161/ijebm.8.4.1.
2. Goodman B., Flaxman S. European union regulations on algorithmic decision making and a “right to explanation”. AI Magazine, 2017, vol. 38, no 3, pp. 50-57, DOI: 10.1609/aimag.v38i3.2741.
3. Zhu J., Liapis A., Risi S. et al. Explainable AI for designers: A human-centered perspective on mixed-initiative co-creation. 2018 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG), 2018, pp. 1-8, DOI: 10.1109/CIG.2018.8490433.
4. Woodruff A., Fox S., Rousso-Schindler S. et al. A qualitative exploration of perceptions of algorithmic fairness. Proceedings Conference on human factors in computing systems, 2018, pp. 1-14, DOI: 10.1609/aimag.v38i3.2741.
5. Ходашинский И.А. Этические проблемы искусственного интеллекта / И.А. Ходашинский, Ю.А. Шурыгин, К.С. Сарин и др. // Современное образование: интеграция образования, науки, бизнеса и власти. Трансформация образования, науки и производства - основа технологического прорыва: материалы международной научно-методической конференции. В 2 ч., Томск, 26-27 января 2023 года. Том Часть 2. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2023. – С. 125-129. – EDN XDAZY0.
6. Gunning D., Aha W. DARPA's explainable Artificial Intelligence (XAI) program. AI Magazine, 2019, vol. 40, pp. 44-58, DOI: 10.1609/aimag.v40i2.2850.
7. Ahmed I., Jeon G., Piccialli F. From Artificial Intelligence to explainable Artificial Intelligence in industry 4.0: a survey on what, how, and where. IEEE Transactions on industrial informatics, 2022, vol. 18, pp. 5031-5042, DOI: 10.1109/TII.2022.3146552.
8. Moral J.M.A., Castiello C., Magdalena L. et al. Explainable fuzzy systems. studies in computational intelligence. Springer: Cham, 2021, vol. 970, 232 p., DOI: 10.1007/978-3-030-71098-9.
9. Borisov V., Leemann T., Sesler K. et al. Deep neural networks and tabular data: a survey. IEEE Transactions on neural networks and learning systems, 2024, vol. 35, no. 6, pp. 7499-7519, DOI: 10.1109/TNNLS.2022.3229161.

10. Castelvechi D. Can we open the black box of AI? *Nature*, 2016, vol. 538, pp. 20-23, DOI:10.1038/538020a.
11. Lipton Z.C. The mythos of model interpretability. *Communications of the ACM*, 2016, vol. 61, pp. 36-43, DOI:10.1145/3233231.
12. Zadeh L.A. From computing with numbers to computing with words. From manipulation of measurements to manipulation of perception. *IEEE Transactions on circuits and systems I: fundamental theory and applications*, 1999, vol. 46, no 1, pp. 105-119, DOI: 10.1109/81.739259.
13. Zadeh L.A. Toward human-level machine intelligence: is it achievable? The need for a paradigm shift. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2008, vol.3, no 3, pp. 11-22, DOI: 10.1109/MCI.2008.926583.
14. Casalino G., Castellano G., Castiello C. et al. Effect of fuzziness in fuzzy rule-based classifiers defined by strong fuzzy partitions and winner-takes-all inference. *Soft Computing*, 2022, vol. 26, pp. 6519-6527, DOI: 10.1007/s00500-022-07128-2.
15. Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П. Харт; Пер. с англ. Г. Г. Вайнштейна и А.М. Васьковского; Под ред. В.Л. Стефанюка. – Москва: Мир, 1976. – 511 с.
16. Herrera F. Genetic fuzzy systems: taxonomy, current research trends and prospects. *Evolution Intelligence*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 27-46, DOI: 10.1007/s12065-007-0001-5.
17. Jang R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, 1993, vol.23, pp. 665-685, DOI: 10.1109/21.256541.
18. Cui Y., Wu D., Huang J. Optimize TSK fuzzy systems for classification problems: minibatch gradient descent with uniform regularization and batch normalization. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 2020, vol. 28, no. 12, pp. 3065-3075, DOI: 10.48550/arXiv.1908.00636.
19. Haque F., Reaz M.B.I., Chowdhury M.E.H. et al. Diabetic sensorimotor polyneuropathy severity classification using adaptive neuro fuzzy inference system. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 7618-7631, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3048742.
20. Kanwal S., Jiriwibhakorn S. Advanced fault detection, classification, and localization in transmission lines: a comparative study of ANFIS, neural networks, and hybrid methods. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 49017-49033, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3384761.
21. Бардамова М.Б. Формирование структуры нечёткого классификатора комбинацией алгоритма экстремумов классов и алгоритма «прыгающих лягушек» для несбалансированных данных с двумя классами / М.Б. Бардамова, И.А. Ходашинский // *Автометрия*, 2021. – Т. 57. – № 4. – С. 54-64. – DOI: 10.15372/AUT20210407. – EDN: BDRGMV.
22. Корышев Н.П. Алгоритм формирования базы правил нечёткого классификатора на основе алгоритма кластеризации K-средних и метаэвристического алгоритма «китов» / Н.П. Корышев, И.А. Ходашинский // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*, 2021. – Т. 24. – № 1. – С. 42-47. – DOI: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-42-47.
23. Остапенко Р.О. Построение нечёткого классификатора на основе метаэвристического алгоритма «саранчи» / Р.О. Остапенко, И.А. Ходашинский, Ю.А. Шурыгин // *Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы*, 2023. – № 11. – С. 26-40. – DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-2-31-36.
24. Black box optimization, machine learning, and no-free lunch theorems, Eds. P.M. Pardalos, V. Rasskazova, M.N. Vrahatis. Cham: Springer, Springer optimization and its applications, 2021, vol. 170, 388 p., DOI: 10.1007/978-3-030-66515-9.
25. Ishibuchi H., Narashima T., Morisawa T. Voting in fuzzy rule-based systems for pattern classification problem. *Fuzzy sets and systems*, 1999, vol. 103, no 1, pp. 223-238, DOI: 10.1016/S0165-0114(98)00223-1.
26. Сарин К.С. Гибридный алгоритм смешанной многокритериальной оптимизации «кукушкин поиск» с генетическим оператором скрещивания / К.С. Сарин // *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2024. – № 2. – С. 87-105. – DOI: 10.14357/20718594240207. – EDN: VQYBOD
27. Herrera F., Martinez-Lopez L. A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 2000, vol. 8, iss. 6, pp. 746-752, DOI: 10.1109/91.890332.
28. Ishibuchi H., Nakashima T., Nii M. Classification and modeling with linguistic information granules. Berlin: Springer, 2005, 308 p., DOI: 10.1007/b138232.
29. Alcalá R., Nojima Y., Herrera F. et al. Multiobjective genetic fuzzy rule selection of single granularity-based fuzzy classification rules and its interaction with the lateral tuning of membership functions. *Soft Computing*, 2011, vol. 15, pp. 2303-2318, DOI: 10.1007/s00500-010-0671-2.
30. Demsar J. Statistical comparisons of classifiers over multiple data sets. *Journal of machine learning research*, 2006, vol. 7, pp. 1-30.
31. Garsia S., Herrera F. An extension on “statistical comparisons of classifiers over multiple data sets” for all pairwise comparisons. *Journal of machine learning research*, 2008, vol. 9, pp. 2677-2694.

32. Garsia S., Fernandez A., Luengo J. et al. Advanced nonparametric tests for multiple comparisons in the design of experiments in computational intelligence and data mining: Experimental analysis of power. *Information Sciences*, 2010, vol. 180, pp. 2044-2064, DOI:10.1016/j.ins.2009.12.010.

Сарин Константин Сергеевич. Доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). Область научных исследований связана с интеллектуальным анализом данных, нечеткими системами и методами оптимизации. AuthorID: 947352, SPIN: 4838-1814, ORCID: 0000-0003-3264-7768, sarin.konstantin@mail.ru, Россия, г. Томск, ул. Вершинина, 74.

UDC 004.85

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.002

Adapted gradient descent algorithm for tuning parameters of fuzzy classifier

Konstantin S. Sarin

Tomsk state university of control systems and radioelectronics,
Russia, Tomsk, sarin.konstantin@mail.ru

Abstract. The use of artificial intelligence systems for critical areas of human life requires trust in the result obtained by the system. An explanation of the obtained solution is important for ensuring trust. Fuzzy systems have the property of explainability due to the presence of a base of production rules in natural language. This work is devoted to the development of a gradient descent algorithm for adjusting the parameters of fuzzy classifiers. Experiments on 38 data sets showed that the use of the developed algorithm for classifiers built by a metaheuristic algorithm statistically significantly increases the accuracy of classification.

Keywords: fuzzy systems, classification, data analysis, optimization algorithms

Acknowledgements: The author expresses deep gratitude to Ilya Aleksandrovich Hodashinsky, professor of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, for the discussion of this study and a number of valuable advice and comments. The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-21-00168, <https://rscf.ru/project/24-21-00168/>.

References

1. Wiese T. Predictive maintenance using Artificial Intelligence in critical infrastructure: a decision-making framework. *International journal of engineering, business and management*, 2024, vol. 8, no 4, pp. 1-4, DOI: 10.22161/ijebm.8.4.1.
2. Goodman B., Flaxman S. European union regulations on algorithmic decision making and a “right to explanation”. *AI Magazine*, 2017, vol. 38, no 3, pp. 50-57, DOI: 10.1609/aimag.v38i3.2741.
3. Zhu J., Liapis A., Risi S. et al. Explainable AI for designers: A human-centered perspective on mixed-initiative co-creation. 2018 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG), 2018, pp. 1-8, DOI: 10.1109/CIG.2018.8490433.
4. Woodruff A., Fox S., Rousso-Schindler S. et al. A qualitative exploration of perceptions of algorithmic fairness. *Proceedings Conference on human factors in computing systems*, 2018, pp. 1-14, DOI: 10.1609/aimag.v38i3.2741.
5. Hodashinsky I.A., Shurygin Yu.A., Sarin K.S. et al. Eticheskie problemy iskusstvennogo intellekta [Ethical Issues of Artificial Intelligence]. *Sovremennoe obrazovanie: integraciya obrazovaniya, nauki, biznesa i vlasti. Transformaciya obrazovaniya, nauki i proizvodstva - osnova tekhnologicheskogo proryva: materialy mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii* [Modern education: integration of education, science, business and government. Transformation of education, science and production - the basis of technological breakthrough: materials of the international scientific and methodological conference]. Tomsk, 26-27 yanvarya 2023 goda, Tomsk: Tomskiy gosudarstvennyy universitet sistem upravleniya i radioelektroniki [Tomsk, 26-27 January 2023, Tomsk: Tomsk state university of control systems and radioelectronics], 2023, vol 2, pp. 125-129, EDN XDAZY0.
6. Gunning D., Aha W. DARPA's explainable Artificial Intelligence (XAI) program. *AI Magazine*, 2019, vol. 40, pp. 44-58, DOI: 10.1609/aimag.v40i2.2850.

7. Ahmed I., Jeon G., Piccialli F. From Artificial Intelligence to explainable Artificial Intelligence in industry 4.0: a survey on what, how, and where. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 2022, vol. 18, pp. 5031-5042, DOI: 10.1109/TII.2022.3146552.
8. Moral J.M.A., Castiello C., Magdalena L. et al. *Explainable fuzzy systems. studies in computational intelligence*. Springer: Cham, 2021, vol. 970, 232 p., DOI: 10.1007/978-3-030-71098-9.
9. Borisov V., Leemann T., Sesler K. et al. Deep neural networks and tabular data: a survey. *IEEE Transactions on neural networks and learning systems*, 2024, vol. 35, no. 6, pp. 7499-7519, DOI: 10.1109/TNNLS.2022.3229161.
10. Castelvechi D. Can we open the black box of AI? *Nature*, 2016, vol. 538, pp. 20-23, DOI:10.1038/538020a.
11. Lipton Z.C. The mythos of model interpretability. *Communications of the ACM*, 2016, vol. 61, pp. 36-43, DOI:10.1145/3233231.
12. Zadeh L.A. From computing with numbers to computing with words. From manipulation of measurements to manipulation of perception. *IEEE Transactions on circuits and systems I: fundamental theory and applications*, 1999, vol. 46, no 1, pp. 105-119, DOI: 10.1109/81.739259.
13. Zadeh L.A. Toward human-level machine intelligence: is it achievable? The need for a paradigm shift. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2008, vol.3, no 3, pp. 11-22, DOI: 10.1109/MCI.2008.926583.
14. Casalino G., Castellano G., Castiello C. et al. Effect of fuzziness in fuzzy rule-based classifiers defined by strong fuzzy partitions and winner-takes-all inference. *Soft Computing*, 2022, vol. 26, pp. 6519-6527, DOI: 10.1007/s00500-022-07128-2.
15. Duda R., Hart P. *Распознавание образов и анализ стсен [Pattern classification and scene analysis]*. Москва: Mir [Moscow: Mir], 1976, 511 p.
16. Herrera F. Genetic fuzzy systems: taxonomy, current research trends and prospects. *Evolution Intelligence*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 27-46, DOI: 10.1007/s12065-007-0001-5.
17. Jang R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, 1993, vol.23, pp. 665-685, DOI: 10.1109/21.256541.
18. Cui Y., Wu D., Huang J. Optimize TSK fuzzy systems for classification problems: minibatch gradient descent with uniform regularization and batch normalization. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 2020, vol. 28, no. 12, pp. 3065-3075, DOI: 10.48550/arXiv.1908.00636.
19. Haque F., Reaz M.B.I., Chowdhury M.E.H. et al. Diabetic sensorimotor polyneuropathy severity classification using adaptive neuro fuzzy inference system. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 7618-7631, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3048742.
20. Kanwal S., Jiriwibhakorn S. Advanced fault detection, classification, and localization in transmission lines: a comparative study of ANFIS, neural networks, and hybrid methods. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 49017-49033, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3384761.
21. Bardamova M.B., Hodashinsky I.A. Formirovaniye struktury nehotkogo klassifikatora kombinatsiyey algoritma ekstremumov klassov i algoritma "prygayushchikh lyagushek" dlya nesbalansirovannykh dannyykh s dvumya klassami [Formation of fuzzy classifier structure by a combination of the class extremum algorithm and the shuffled frog leaping algorithm for imbalanced data with two classes]. *Avtometriya [Avtometriya]*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 378-387, DOI: 10.15372/AUT20210407, EDN: BDRGMV.
22. Koryshev N.P., Hodashinsky I.A. Algoritm formirovaniya bazy pravil nechyotkogo klassifikatora na osnove algoritma klasterizatsii K-srednih i metaevristicheskogo algoritma "kitov" [Algorithm to forming a rule base for a fuzzy classifier de-signed on the basis of the K-means clustering algorithm and the whale optimization algorithm]. *Doklady TUSUR [Reports of TUSUR]*, 2021, vol. 24, no 1, pp. 42-47, DOI: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-42-47.
23. Ostapenko R.O., Hodashinsky I.A., Shurygin Yu.A. Postroyeniye nehotkogo klassifikatora na osnove metaevristicheskogo algoritma "saranchi" [Using the grasshopper optimization algorithm for fuzzy classifier design]. *Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya. Seriya 2: Informatsionnyye protsessy i sistemy [Scientific and technical information. Series 2: Information processes and systems]*, 2023, no. 11, pp. 26-40, DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-2-31-36.
24. Black box optimization, machine learning, and no-free lunch theorems, Eds. P.M. Pardalos, V. Rasskazova, M.N. Vrahatis. Cham: Springer, Springer optimization and its applications, 2021, vol. 170, 388 p., DOI: 10.1007/978-3-030-66515-9.
25. Ishibuchi H., Narashima T., Morisawa T. Voting in fuzzy rule-based systems for pattern classification problem. *Fuzzy sets and systems*, 1999, vol. 103, no 1, pp. 223-238, DOI: 10.1016/S0165-0114(98)00223-1.
26. Sarin K.S. Gibridnyj algoritm smeshannoj mnogokriterial'noj optimizatsii "kukushkin poisk" s geneticheskimi operatorom skreshchivaniya [Hybrid algorithm of mixed-integer multi-objective optimization "cuckoo search" with genetic crossover operator]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij [Artificial intelligence and decision making]*, 2024, no 2, pp. 87-105, DOI: 10.14357/20718594240207, EDN: VQYBOD.

27. Herrera F., Martinez-Lopez L. A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. IEEE Transactions on fuzzy systems, 2000, vol. 8, iss. 6, pp. 746-752, DOI: 10.1109/91.890332.
28. Ishibuchi H., Nakashima T., Nii M. Classification and modeling with linguistic information granules. Berlin: Springer, 2005, 308 p., DOI: 10.1007/b138232.
29. Alcalá R., Nojima Y., Herrera F. et al. Multiobjective genetic fuzzy rule selection of single granularity-based fuzzy classification rules and its interaction with the lateral tuning of membership functions. Soft Computing, 2011, vol. 15, pp. 2303-2318, DOI: 10.1007/s00500-010-0671-2.
30. Demsar J. Statistical comparisons of classifiers over multiple data sets. Journal of machine learning research, 2006, vol. 7, pp. 1-30.
31. Garsia S., Herrera F. An extension on “statistical comparisons of classifiers over multiple data sets” for all pairwise comparisons. Journal of machine learning research, 2008, vol. 9, pp. 2677-2694.
32. Garsia S., Fernandez A., Luengo J. et al. Advanced nonparametric tests for multiple comparisons in the design of experiments in computational intelligence and data mining: Experimental analysis of power. Information Sciences, 2010, vol. 180, pp. 2044-2064, DOI:10.1016/j.ins.2009.12.010.

Sarin Konstantin Sergeevich. Associate professor, candidate of technical sciences, associate professor of the department of computer systems in control and design (KSUP) of Tomsk state university of control systems and radioelectronics (TUSUR). The area of scientific research is related to data mining, fuzzy systems and optimization methods. AuthorID: 947352, SPIN: 4838-1814, ORCID: 0000-0003-3264-7768, sarin.konstantin@mail.ru, Russia, Tomsk, Vershinina St., 74.

Статья поступила в редакцию 03.03.2025; одобрена после рецензирования 26.03.2025; принята к публикации 10.04.2025.

The article was submitted 03/03/2025; approved after reviewing 03/26/2025; accepted for publication 04/10/2025.

Применение миварных технологий логического искусственного интеллекта для создания умных производственных систем

Варламов Олег Олегович

МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИИ МИВАР,

Россия, Москва, ovar@yandex.ru

Аннотация. Опыт научных исследований и практических работ показал, что в области умных производственных систем возможно и целесообразно создание миварных экспертных систем (МЭС) для повышения интеллектуализации принятия решений и обработки информации. Это позволяет повысить качество производимой продукции и перейти на новый уровень создания автоматизированных систем управления производственными системами. Для создания полноценных МЭС в области умных производственных систем необходимо провести разноплановую научную и практическую работу, причем силами людей разных специальностей, которые должны быть объединены в единый коллектив. Эволюционное развитие каждой миварной экспертной системы умных производственных систем обеспечивается тем, что МЭС обладает свойством эволюционности и в любой момент времени может быть добавлено, изменено или удалено любое правило. Это многократно проверено в ходе выполнения групповых научных проектов, когда эволюционно добавлялись новые правила по добавляемым процессам принятия решений и обработки информации для различных производственных систем.

Ключевые слова: мивар, искусственный интеллект, миварные экспертные системы, машиностроение, интеллектуализация принятия решений и обработки информации, умные производственные системы, MOGAN, MIPRA, КЭСМИ, Wi!Mi, Разуматор, Большие Знания, роботы, моделирование, обучение, машиностроительный ИИ

Цитирование: Варламов О.О. Применение миварных технологий логического искусственного интеллекта для создания умных производственных систем / О.О. Варламов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2(38). – С. 32-46. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.003.

Введение. В настоящее время в машиностроении важной темой является применение технологий искусственного интеллекта (ИИ) для создания умных производственных систем. Миварные технологии [1] логического искусственного интеллекта [2] активно развиваются с 2002 года, когда был предложен алгоритм логического вывода линейной вычислительной сложности [3]. Подчеркнем, что в РИНЦ по миварным технологиям ИИ размещено уже более тысячи научных публикаций. В международных англоязычных журналах уровня Q1/Q2 также опубликованы статьи по созданию миварных экспертных систем (МЭС), например, о конструкторе МЭС «КЭСМИ Wi!Mi Разуматор» [4], о применении МЭС для беспилотного транспорта [5] и в качестве систем принятия решений (СПР) – «мозгов для автономных роботов» [6], а также для решения задач STRIPS-программирования и сложного планирования действий роботов MIPRA [7].

Для научной области «Умные производственные системы» важно отметить, что миварные технологии применяют для моделирования сложных систем управления технологическими процессами [8] с возможностью распараллеливания алгоритмов в научно-технических и вычислительных задачах [9], для сравнения многомерных векторов [10] и для практического применения в АСУ и экспертных системах реального времени [11]. На данный момент важно отметить, что задачи распознавания изображений и понимания образов [12], а также семантического обнаружения объектов [13] успешно решаются на основе миварных экспертных систем, так же, как и для планирования траектории робота и создания систем принятия решений "РОБО!РАЗУМ" групп автономных роботов, комбайнов, тракторов и т.п. [14]. Для области умных производственных систем наиболее важное значение имеет опыт применения миварных технологий в робототехнике. Исследования по применению технологий искусственного интеллекта для умных производственных систем целесообразно

проводить в рамках создания Больших Знаний и расширения областей внедрения миварных технологий ИИ [15]. «Большие Знания» [15] – это объединение и синтез разнородных баз знаний, что обеспечивает качественный переход и предоставляет большие возможности для создания систем ИИ [15], включая и Умные производственные системы.

Напомним [15], что главное преимущество МЭС состоит в кардинальном снижении вычислительной сложности логического вывода и/или автоматического построения алгоритмов с $N!$ до линейной (N) (относительно количества правил «Если, То») и расширение базовых продукций формата «Если, То» от обычной логики до реализации вычислительных процедур, сервисов, агентов и т.п., включая описание процессов в формате «Вход-Действие-Выход», в едином информационно-управляющем пространстве (ЕИУП) [15]. Изначально область ИИ [16] занималась автоматизацией разумной [17] деятельности человека [18]. Логический вывод и экспертные системы были основой «второй волны ИИ» в 80-90 годы прошлого века [18]. Термин «базы знаний» появился тогда же и широко использовался в области ИИ [18]. База знаний (БЗ) – основа систем логического ИИ, как одного из классов интеллектуальных систем [19], где знания описаны на некотором языке представления знаний [15, 20]. Напомним [21], что традиционные [22] экспертные системы [23, 24] (ЭС) как самостоятельное научное направление [25] сформировалось [26] в конце 1970 гг. [27]. Этап активного развития ЭС в СССР [28, 29] пришелся на 1980-1990 годы [30, 31]. В области ЭС были исследования [32] по оптимизации [33] логического вывода и различного представления знаний [34], например, в виде онтологий [35]. Также, были проведены работы по альтернативным [36] средствам ускорения вывода в продукционных [37] ЭС на основе Rete-сетей [38]. Отдельным направлением стали попытки ускорить работу ЭС на основе сетей Петри [39], которые применялись для моделирования систем [40]. Отметим, что и в России [41] применяли подобные алгоритму Rete способы причинно-следственного упорядочивания [42] и организации знаний [43] для правдоподобных [44] рассуждений [15]. Кроме того, существуют научные наработки по созданию миварных баз знаний (МБЗ) [45] с их успешными примерами реализации [46] в различных сферах ИИ [47], включая и планирование ресурсов цеха [48], а также умные [49] производственные системы [50] и многое другое [51]. Следовательно, тематика данного исследования актуальна и имеет большое практическое значение для области «Умные производственные системы» (УмПС).

Рекомендации по применению МЭС для УмПС. Рассмотрим опыт внедрения технологий ИИ для создания различных УмПС. Успешным получился опыт, когда аналитики и разработчики выполняют совместно «Групповой Проект» (ГП) по проектированию и реализации УмПС с использованием технологий искусственного интеллекта, включающих миварные и нейронные сети. В аналитической работе ГП должна быть обязательно описана Производственная Система (ПС). В состав группы рекомендуется включать до пяти исполнителей с различными компетенциями и ролями. Наш опыт показал, что для успешного выполнения ГП должны быть выполнены следующие три этапа:

- Анализируется и описывается некоторая производственная система.
- Анализируется и описывается автоматизированная система управления (АСУ) данной ПС, выделяются в явном виде датчики приема информации и акторы, оказывающие влияние на функционирование ПС.
- Предлагается интеллектуализация АСУ ПС с помощью создания миварной экспертной системы для подготовки, выработки, поддержки принятия и автономного принятия управленческих решений.

Важно отметить, что системы искусственного интеллекта для ПС обладают двумя признаками:

- автоматическое построение алгоритмов принятия решений на основе правил в базе знаний в различных ситуациях (отсутствие «жестких» и заранее написанных алгоритмов) – еще это называют «решение творческих задач»;
- обучение или самообучение, т.е. возможность получения новых объектов предметной области и правил принятия решений в процессе функционирования и без дополнительного переучивания и настройки.

Интеллектуализация АСУ. Процесс интеллектуализации АСУ может включать следующие этапы:

1. Миварная система поддержки принятия решений (МСППР) для человека-оператора АСУ ПС, которая разрабатывается и реализуется в дополнение к существующей АСУ ПС, но не взаимодействует с ней. Такая МСППР является автономной системой и взаимодействует только с человеком-оператором, который вводит в нее все необходимые данные, активирует процесс поиска алгоритма решения и затем выполняет самостоятельно этот алгоритм на АСУ ПС.

2. Миварная система принятия решений (МСПР) для помощи человеку-оператору АСУ ПС, но уже с возможностью по специальному регламенту получения данных из АСУ ПС и выдачи управленческих воздействий в АСУ ПС в тех случаях, когда человек не реагирует на сигналы АСУ ПС. МСПР является развитием МСППР из предыдущего пункта и может помогать человеку-оператору в определенных случаях.

3. Автономная Миварная система принятия решений (АМСПР), которая без человека-оператора получает данные из АСУ ПС, формирует требуемые алгоритмы принятия решений и затем выдает управленческие воздействия на АСУ ПС. Человек-оператор может контролировать такую АМСПР, которая в обычном режиме будет функционировать без человека (полноценный «автопилот»).

Рекомендуется в качестве цели Группового проекта формулировать «интеллектуализацию АСУ ПС».

Особо отметим, что в тех случаях, *когда АСУ еще не существует*, то можно начинать с создания автоматизированной системы управления с одновременным переходом к ее интеллектуализации в плане выработки и принятия управленческих решений на основе систем ИИ с применением миварных и нейронных сетей. Возможно простое *создание МЭС для последующего обучения и тестирования работников предприятия*, если АСУ не создана.

Рекомендуется формулировать и решать следующие задачи ГП:

1. Анализ предметной области выбранной производственной системы.
2. Формализованное описание процесса управления производственной системой в формализме правил «Если, То» или «Вход; Действие; Выход» с явным перечислением всех основных объектов, а также с выделением системы технического зрения (включая и зрение человека в определенных случаях) в виде датчиков получения данных и выделением всех акторов, которые оказывают воздействие на ПС (например: вентили, запорные краны, изменение маршрутов заготовок, деталей и т.п.).
3. Разработка миварной базы знаний (МБЗ) для интеллектуализации АСУ ПС.
4. Создание миварной экспертной системы (МЭС) для поддержки принятия решений человеком-оператором в АСУ ПС.
5. Проведение тестирования МЭС для АСУ ПС и подготовка отчета об экспериментальных исследованиях и достижения цели работы.

Для создания МЭС необходимо разработать МБЗ. Групповой Проект может завершаться на теоретическом этапе разработки миварной базы знаний – МБЗ. Важно отметить, что для тестирования МБЗ необходимо подготовить заранее с помощью экспертов по предметной

области, как минимум, три различных тестовых сценария – примеров подготовки и принятия решений для конкретной ПС. Например, один сценарий «нормальной работы», а два других сценария – для аварийных или нестандартных режимов работы производственной системы.

Критериями достижения цели создания МЭС могут быть следующие:

- Сокращение времени подготовки и принятия управленческих решений.
- Повышение надежности работы ПС за счет недопущения ошибок из-за «человеческого фактора».
- Повышение качества продукции ПС за счет недопущения брака и отклонений из-за «человеческого фактора».
- Снижение себестоимости продукции за счет сокращения количества людей-операторов.
- Снижение себестоимости продукции за счет увеличения времени работы ПС.

Научная составляющая исследования и перспективы МЭС для УмПС. Для создания таких МЭС необходимо выполнить и разработать:

- 1) анализ УмПС, особенности принятия решений и обработки информации;
- 2) формализованное описание УмПС;
- 3) табличное представление миварной модели описания принятия решений и обработки информации в формализме двудольных ориентированных графов;
- 4) алгоритмы принятия решений и обработки информации в предметной области;
- 5) миварную сеть в специальном математическом обеспечении (например, в КЭСМИ Wi!Mi Разуматоре версии 2.1);
- 6) тестирование миварных моделей УмПС;
- 7) эволюционное развитие МЭС для УмПС.

Отметим, что для выполнения всех подобных научных исследований необходима команда различных специалистов, включающая, как минимум:

- 1) экспертов по предметной области (например, промышленного объекта по производству колесных дисков),
- 2) когнитологов (инженеров по знаниям), которые будут создавать «Знания» в виде текстового формализованного описания предметной области;
- 3) аналитиков, которые будут создавать «Знания» в виде миварных сетей на основе формализованного описания УмПС, а также загружать их в КЭСМИ;
- 4) программистов;
- 5) тестировщиков.

Таким образом, получаем, что для создания МЭС в области умных производственных систем необходимо провести разноплановую научную и практическую работу, причем силами людей разных специальностей, которые должны быть объединены в коллектив.

Результаты создания макетов МЭС для разных УмПС. За осень 2024 года и начало 2025 года успешно подготовлены несколько десятков макетов МБЗ или МЭС для различных применений по созданию Умных ПС. Приведем перечень некоторых выполненных групповых проектов и созданных макетов программного обеспечения.

Прежде всего, были созданы макеты миварных баз знаний для следующих УмПС:

- МБЗ для контроля и предотвращения брака при производстве сварных труб.
- МБЗ для механической фильтрации технологических жидкостей.
- МБЗ для производственных систем угольного производства.
- МБЗ для процесса производства обуви.
- МБЗ для распределения желатиновых капсул для лекарственных препаратов в подходящие комнаты хранения.

- МБЗ для системы производства углерода из воздуха.
- МБЗ для управления бетонным узлом (Вьетнам).
- МБЗ для шампанизации непрерывном методом.
- МБЗ по подбору датчиков давления.

Другие групповые проекты завершились созданием не только МБЗ, но и реализацией такой базы знаний в МЭС в программном комплексе КЭСМИ Wi!Mi Разуматор, версия 2.1:

- МЭС диагностики и предиктивного обслуживания оборудования на производстве картона.
- МЭС для автоматизации выбора частотного преобразователя.
- МЭС для автоматизации и оптимизации процесса форсированного испытания блоков питания.
- МЭС для анализа ошибок производства материнских плат.
- МЭС для генерации маршрутной карты.
- МЭС для диагностики бактериальной устойчивости к антибиотикам.
- МЭС для информационно-аналитической системы обследования целостности сооружений.
- МЭС для контроля и предотвращения брака при производстве керамической плитки.
- МЭС для контроля конфигурации вафельной печи.
- МЭС для контроля технической документации.
- МЭС для поддержки принятия решений инженеров КИИПиА на линии производства поршня двигателя внутреннего сгорания.
- МЭС для поддержки принятия решений персонала газового завода (Венесуэла).
- МЭС для поддержки принятия решений персонала газоперерабатывающего цеха при добыче жидкой серы.
- МЭС для поддержки принятия решений персонала завода по производству рельс.
- МЭС для поддержки принятия решений персонала завода производства стеклянных бутылок.
- МЭС для поддержки принятия решений персонала завода производства бетонных блоков.
- МЭС для поддержки принятия решений персонала механообрабатывающего завода.
- МЭС для поддержки принятия решений персонала мясокомбината.
- МЭС для поддержки принятия решений персонала установки подачи и хранения азота.
- МЭС для поддержки принятия решения персонала на производстве планетарно-цевочных редукторов.
- МЭС для поддержки принятия решения персонала на производстве светодиодов.
- МЭС для производства газированных напитков.
- МЭС для производства колесных дисков.
- МЭС для работы с фрезерным станком ЧПУ.
- МЭС определения условий хранения для среднегабаритных изделий.
- МЭС по подбору электродвигателя для привода цепного транспортера.
- МЭС подбора конвейера.
- МЭС УмПС разведения и подбора породы собак для владельцев без опыта.
- МЭС подбора режущего инструмента.
- МЭС подбора станка для обработки заготовки.
- МЭС поддержки принятия решений о способе устранения отказов токарного станка.

- МЭС производства фасадных панелей.
- МЭС технического обслуживания и ремонта производственного оборудования.

Отдельно отметим совместное комплексное применение миварных и нейронных сетей для создания УмПС в следующих проектах:

- МЭС для сортировки фруктов.
- МЭС для выявления дефектов на производстве ПЭТ бутылок.
- МЭС контроля деятельности сотрудника в мегалаборатории с применением цифровой симуляции и машинного зрения.
- Нахождение дефектов на производстве хлебных изделий с использованием МЭС и машинного зрения.
- МБЗ для производственной системы музеев и картинных галерей для выявления и обследования дефектов картин.
- Применение МЭС в производстве кухонного гарнитура.
- Применение МЭС в технологическом процессе переработки пластиковых отходов.

К настоящему моменту научные статьи опубликованы только для двух таких примеров выполнения проектов: Миварная экспертная система для поддержки принятия решений персонала на производстве планетарных редукторов [49] и Миварная экспертная система для подбора электродвигателя [50].

МЭС для персонала на производстве планетарных редукторов. В данной работе разработана МЭС, задача которой – наблюдение за ходом производства редукторов, поддержка принятия решений и своевременное оповещение сотрудников предприятия о наличии ошибок и отклонений [49]. Основой принятия решений служит миварная база знаний, которая получена на основе формализованного описания этапов и параметров технологического процесса производства редукторов. В этой работе обоснована целесообразность использования МЭС для автоматизации производственных процессов, связанных со сборкой редукторов, их испытаниями и хранением на складе. По сути, создана новая математическая модель таких ПС, представленная в виде таблицы модернизированных продукционных правил «Если, То, Иначе», которых разработано более 30 шт. [49].

Приведем в Таблице 1 фрагмент формализованного описания этой УмПС в виде правил «Если, То, Иначе» [49].

Таблица 1. Миварная база знаний (фрагмент)

№	Класс	Если	То	Иначе
1	Пр.р.	начат процесс производства (prod==1)	приносим детали на сборочный стол (det=1)	не приносим (det=0)
2	ПР	детали есть на сборочном столе (det==1)	переходим в состояние проверки (pr1=1)	сообщаем оператору (pr1=0)
3	КД	началась проверка (pr1==1) И количество деталей равно 23 (cnt_det==23)	не меняем состояние (kd1=1)	сообщаем оператору о нехватке деталей (kd1=0)
4	РД	началась проверка (pr1==1) И число проверенных размеров деталей равно 78 (cnt_r==78)	не меняем состояние (rd1=1)	сообщаем оператору о неправильных размерах (rd1=0)
5	ДСЗ	началась проверка (pr1==1) И есть смазочная жидкость (sm==1)	не меняем состояние (s1=1)	сообщаем оператору (s1=0)

№	Класс	Если	То	Иначе
6	C1	проверена комплектность деталей (kd1==1) И проверены размеры деталей (rd1==1)	провести сборку редуктора (sb=1)	не проводим сборку и сообщаем оператору (sb=0)
7	У	редуктор собран (sb==1) И в процессе сборки возникли отходы (waste==1)	осуществляем утилизацию (util=1)	фиксируем отсутствие отходов (util=0)

После разработки МБЗ переходят к созданию МЭС в КЭСМИ. На рисунке 1 представлены классы и параметры, а на рисунке 2 – отношения, которые задают шаблоны для правил. Тестирование созданной МЭС показано на Рисунке 3 на примере испытаний редуктора [49].

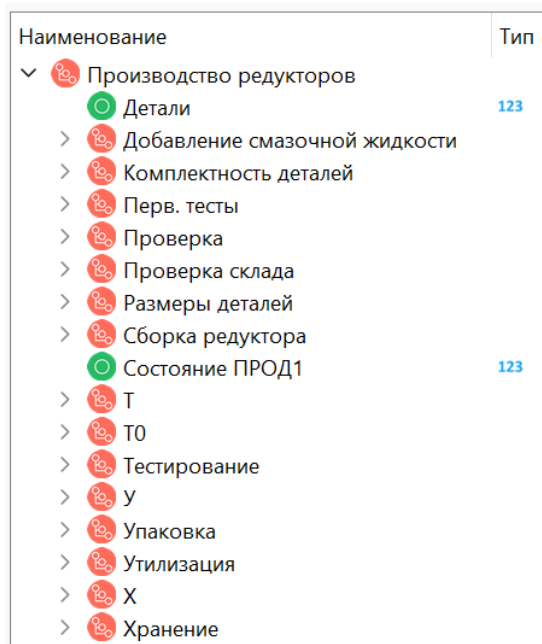


Рис. 1. Параметры и классы

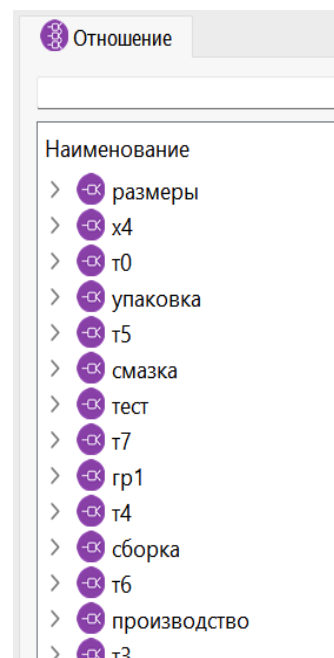


Рис. 2. Отношения

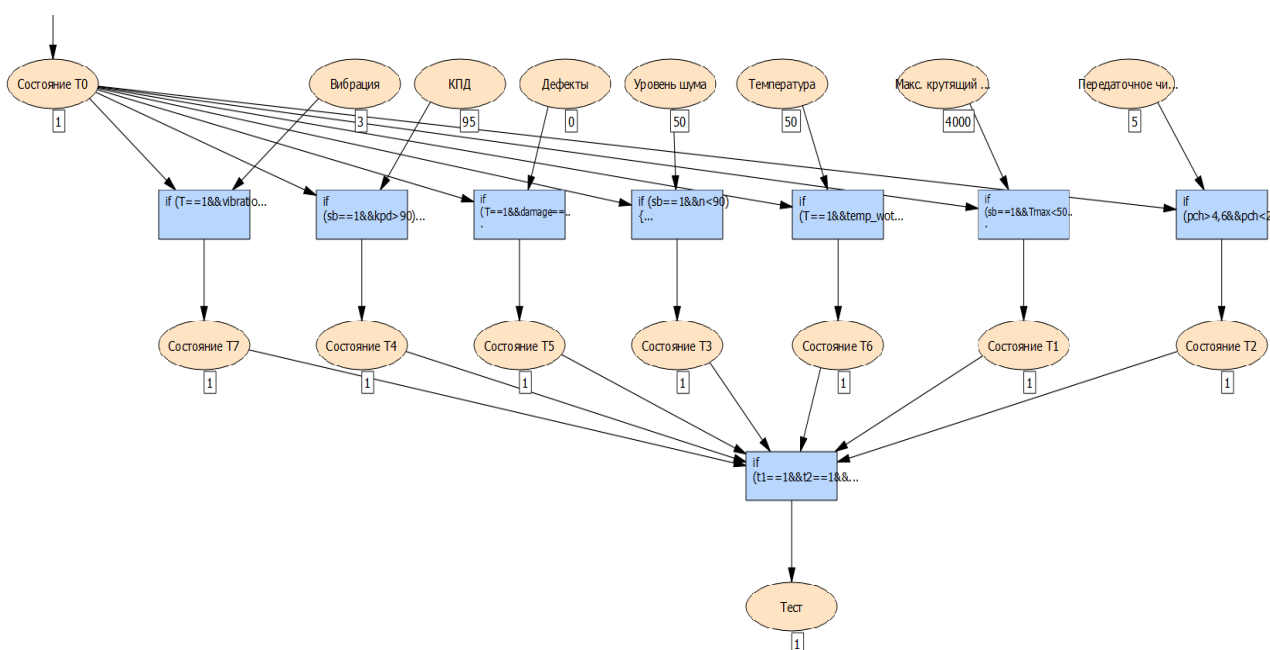


Рис. 3. Результаты тестирования этапа испытаний редукторов

Миварная экспертная система для подбора электродвигателя [50]. Электродвигатели, особенно асинхронные двигатели серии АИР, широко применяются в

различных отраслях промышленности, включая транспортные конвейеры цепного типа [50]. Движение от электродвигателя передается приводному валу через три основных передаточных механизма: редуктор, муфту и открытую передачу. Эти механизмы играют важную роль в обеспечении необходимого крутящего момента и скорости вращения, что критически важно для эффективной работы транспортера [50].

В процессе подбора конкретной модели электродвигателя вычисляются значения параметров различных элементов, входящих в состав привода, что позволяет обеспечить оптимальную работу всего устройства. Исходными данными, как правило, являются требуемые параметры движения приводного вала, такие, как скорость, крутящий момент и другие характеристики, которые необходимо учитывать для достижения наилучших результатов в эксплуатации [50].

Входными данными для МЭС являются: коэффициенты полезного действия (КПД) узлов привода, число зубцов на тяговой звездочке, шаг тяговой цепи, окружная сила на тяговой звездочке, скорость цепи транспортера и синхронная частота вращения электродвигателя [50]. Покажем пример правил предметной области [50]:

- ЕСЛИ требуемая мощность меньше 0,37 кВт и синхронная частота вращения равна 1000, ТО «наименование электродвигателя» принимает значение «71А6», «частота вращения двигателя» принимает значение 915.
- ЕСЛИ требуемая мощность меньше 0,37 кВт и синхронная частота вращения равна 1500, ТО «наименование электродвигателя» принимает значение «такого двигателя нет».

Рассмотрим тестирование МЭС на следующем примере: введенные пользователем параметры корректны и позволяют МЭС подобрать электродвигатель [50].

Входные данные:

- Шаг цепи: 40 мм.
- Скорость цепи: 0,45 м/с.
- Число зубцов: 8.
- КПД ременной передачи: 0,95.
- КПД зубчатой цилиндрической передачи: 0,97.
- КПД муфты соединительной: 0,98.
- КПД подшипников качения приводного вала: 0,99.
- КПД зубчатой волновой передачи: 1.
- КПД зубчатой конической передачи: 1.
- КПД зубчатой планетарной передачи: 1.
- КПД цепной передачи: 1.
- КПД червячной передачи: 1.
- Окружная сила на тяговой звездочке: 2750 Н.
- Синхронная частота вращения ЭД: 1500 об/мин.

На выходе МЭС выдает значения следующих параметров:

- Делительный диаметр тяговой звездочки: 104.53 мм.
- Выходная частота вращения: 82.22 об/мин.
- Выходной момент вращения: 143.72 Н×м.
- Выходная мощность: 1.24 кВт.
- Требуемая мощность: 1.38 кВт.
- Наименование электродвигателя: 80В4.
- Номинальная мощность электродвигателя: 1.5 кВт.
- Номинальная частота вращения электродвигателя: 1395 об/мин.

Таким образом, в [50] исследована возможность разработки и внедрения МЭС в процесс подбора электродвигателя для привода цепного транспортера. Эта система имеет потенциал значительно упростить этап выбора и сократить время принятия решения в области УмПС. Предложенная МЭС не только решает задачу автоматизации и ускорения подбора электродвигателя, но и открывает перспективы [51] для дальнейшего развития интеллектуальных систем в смежных областях.

Заключение. Практический опыт выполнения научных исследований показал, что в области умных производственных систем возможно и целесообразно создание МЭС для повышения интеллектуализации принятия решений и обработки информации. Это позволяет повысить качество производимой продукции и перейти на новый уровень создания автоматизированных систем управления производственными системами.

В процессе реализации 50+ таких групповых проектов успешно выполнены следующие работы для каждой МЭС: выполнен системный анализ предметной области в плане принятия решений, обработки информации и ИИ; разработано формализованное описание предметной области; создана миварная база знаний в виде табличного представления правил миварной сети описания процессов принятия решений, обработки информации; обоснован выбор традиционного для КЭСМИ Wi!Mi Разуматор версии 2.1 метода принятия решений и обработки информации; создана миварная сеть УмПС в программном комплексе КЭСМИ Wi!Mi Разуматор версии 2.1; протестированы миварные модели для различных производствах.

В ходе выполнения групповых проектов многократно создавались новые правила для миварной экспертной системы по добавляемым процессам принятия решений и обработки информации для различных производственных систем, что подтвердило на практике известный факт о том, что МЭС обладает свойством эволюционности и в любой момент времени в ходе работы может быть добавлено, изменено или удалено любое правило.

Список источников

1. Варламов О.О. Миварные технологии как некоторые направления искусственного интеллекта / О.О. Варламов // Проблемы искусственного интеллекта, 2015. – № 1(1). – С. 23-37. – EDN WDNPGZ.
2. Варламов О.О. Автоматизация умственной деятельности людей через логический искусственный интеллект как фундаментальный механизм развития или гибели человечества интеллекта / О.О. Варламов // Проблемы искусственного интеллекта. 2017. – № 3(6). – С. 23-31. – EDN YNTRSV.
3. Варламов О.О. Эволюционные базы данных и знаний для адаптивного синтеза интеллектуальных систем. Миварное информационное пространство / О.О. Варламов. – М.: «Радио и связь», 2002. – 286 с. – EDN RWTCOP.
4. Varlamov O.O. Wi!Mi expert system shell as the novel tool for building knowledge-based systems with linear computational complexity. International review of automatic control, 2018, vol. 11, no. 6, pp. 314-325, DOI: 10.15866/ireaco.v11i6.15855, EDN UNUCCC.
5. Shadrin S.S., Ivanov A.M., Varlamov O.O. Experimental autonomous road vehicle with logical artificial intelligence. Journal of advanced transportation, 2017, vol. 2017, pp. 2492765, DOI: 10.1155/2017/2492765, EDN XNTRKD.
6. Varlamov O. “Brains” For Robots: Application of the mivar expert systems for implementation of autonomous intelligent robots. Big Data Research, 2021, vol. 25, pp. 100241, DOI: 10.1016/j.bdr.2021.100241, EDN HRYLWL.
7. Varlamov O., Aladin D. A New generation of rules-based approach: Mivar-based Intelligent Planning of Robot Actions (MIPRA) and brains for autonomous robots. Machine intelligence research, 2024, vol. 21, no. 5, pp. 919-940, DOI: 10.1007/s11633-023-1473-1, EDN TSPUOP.
8. Сергушин Г.С. Исследование возможностей информационного моделирования сложных систем управления технологическими процессами на основе миварных технологий / Г.С. Сергушин, О.О. Варламов, М.О. Чибирова и др. // Автоматизация и управление в технических системах, 2013. – № 2(4). – С. 51-66. – EDN RDWXUT.
9. Владимиров А.Н. Применение многопроцессорного вычислительного кластера НИИР для распараллеливания алгоритмов в научно-технических и вычислительных задачах / А.Н. Владимиров, О.О. Варламов, А.В. Носов и др. // Труды НИИ Радио, 2009. – № 3. – С. 120-123. – EDN KYNLNN.

10. Семенов А.А. Исследование способов подбора рекламных кампаний на основе сравнения многомерных векторов / А.А. Семенов, О.О. Варламов // Проблемы искусственного интеллекта, 2020. – № 1(16). – С. 89-104. – EDN UEBEPL.
11. Варламов О.О. Миварный метод логико-вычислительной обработки информации для АСУ, тренажеров, экспертных систем реального времени и архитектур, ориентированных на сервисы / О.О. Варламов, Р.А. Санду, А.Н. Владимиров и др. // Искусственный интеллект, 2010. – № 4. – С. 558-565. – EDN TIFHLT.
12. Мащенко Е.И. Создание миварной экспертной системы для понимания образов и принятия решений при обнаружении падений людей / Е.И. Мащенко, Д.К. Карпов, О.О. Варламов и др. // Проблемы искусственного интеллекта, 2024. – № 4(35). – С. 88-100. – DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-88-100. – EDN FGLHZZ.
13. Шэнь Ц. Динамическое планирование траектории робота на основе семантического обнаружения объектов с использованием миварной экспертной системы / Ц. Шэнь, Ш. Гун, О.О. Варламов и др. // Проблемы искусственного интеллекта, 2024. – № 4(35). – С. 164-176. – DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-164-176. – EDN DHVOFC.
14. Варламов О.О. О создании на основе миварных систем принятия решений "РОБО!РАЗУМ" групп автономных комбайнов и тракторов для сельского хозяйства / О.О. Варламов // Проблемы искусственного интеллекта, 2019. – № 2(13). – С. 49-62. – EDN AMUYCK.
15. Варламов О.О. Создание Больших Знаний и расширение областей применения миварных технологий логического искусственного интеллекта / О.О. Варламов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 4(32). – С. 30-41. – DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.003. – EDN THBEWN.
16. Люгер Дж.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. 4-е изд. / Дж.Ф. Люгер. – М.: Вильямс, 2005. – 864 с.
17. Ростовцев Ю.Г. Математические методы и модели оценивания военно-политической обстановки / Ю.Г. Ростовцев. – МО СССР, 1986. – 312 с.
18. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – Санкт-Петербург: Питер, 2000. – 384 с. – EDN TGWANT.
19. Остроух А.В. Введение в искусственный интеллект / А.В. Остроух // Красноярск: Научно-инновационный центр, 2020. – 250 с.
20. Остроух А.В. Интеллектуальные системы / А.В. Остроух // Красноярск: Научно-инновационный центр, 2020. – 316 с.
21. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам / Д. Уотермен. – М.: Мир, 1989. – 388 с.
22. Таунсенд К. Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ / К. Таунсенд, Д. Фохт. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 320 с.
23. Джарратано Д. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. 4-е изд.: Пер с англ. / Д. Джарратано, Г. Райли. – Москва. Вильямс, 2007. – 1152 с. – EDN QMQTDD.
24. Giarratano J.C., Riley G.D. Expert systems: principles and programming, 4-th edition. Course Technology, 2004.
25. Luger F.G. Artificial Intelligence: Structure and Strategies for complex problem solving. Boston: Pearson, 2009.
26. Попов Э.В. Искусственный интеллект: экспертные системы / Э.В. Попов. – М.: Наука, 1990.
27. Экспертные системы. Базы знаний и данных. Материалы семинара // Под рук. Э.В. Попова. – М.: ЦРДЖ, 1992. – 171 с.
28. Кирсанов Б.С. Отечественные оболочки экспертных систем / Б.С. Кирсанов, Э.В. Попов // Справочник по искусственному интеллекту. – М.: Радио и связь, 1990. – Т. 1. – С. 369-388.
29. Попов Э.В. Статистические и динамические экспертные системы / Э.В. Попов, И.Б. Фоминых, Е.Б. Кисель и др. – М.: Финансы и статистика, 1996.
30. Яшин А.М. Разработка экспертных систем / А.М. Яшин. – Л.: ЛПИ, 1990.
31. Справочник по искусственному интеллекту в 3-х т. // Под ред. Э.В. Попова, Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990.
32. Тейз А. Логический подход к искусственному интеллекту: от классической логики к логическому программированию/ А. Тейз, П. Грибомон, Ж. Луи и др. – М.: Мир, 1990. – 432 с.
33. Chandru V., Hooker J. Optimization methods for logical inference. New York: Wiley, 1999.
34. Russel S. J., Norvig P. Artificial Intelligence: a Modern Approach (3rd ed.). Boston: Pearson, 2010.
35. Sadik A.R., Urban B. An ontology-based approach to enable knowledge representation and reasoning. Future Internet, 2017, vol. 9(4), 90, DOI: 10.3390/fi9040090.
36. Forgy Ch. A network match routine for production systems. Working Paper, 1974.
37. Forgy Ch. On the efficient implementation of production systems. Ph. D. Thesis, Carnegie-Mellon University, 1979.

38. Forgy Ch. Rete: A fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem. Artificial Intelligence, 1982, 19, pp. 17-37.
39. Котов В.Е. Сети Петри / В.Е. Котов. – М: Наука, 1984. – 160 с.
40. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон. – М.:, 1984. – 264с.
41. Аршинский Л.В. Многозначные логики с векторной семантикой / Л.В. Аршинский // Восточно-Сибирский институт МВД России. Иркутск, 2003. 46 с. Деп в ВИНТИ 13.02.2003, № 281-В2003. – EDN: QJBXBJ.
42. Аршинский Л.В. Интервальное оценивание истинности в системах автоматизированных рассуждений на основе VTF-логик / Л.В. Аршинский // IV международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'05: труды. Москва. ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова. 2005. – С. 1061-1074.
43. Аршинский Л.В. Организация знаний в системе моделирования правдоподобных рассуждений «Гераклит» / Л.В. Аршинский // XVII Байкальская Всероссийская конференция «Информационные и математические технологии в науке и управлении»: труды. Т. 3. Иркутск. ИСЭМ СО РАН, – 2012. – С. 19-25.
44. Аршинский Л.В. Особенности работы машины вывода системы моделирования правдоподобных рассуждений «Гераклит» / Л.В. Аршинский // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2016. – № 2. – С. 18-29. – EDN WZBLJV.
45. Chuvikov D. A., Aladin D.V., Adamova L.E. et al. A new method for creating Mivar knowledge bases in tabular-matrix form for ground intelligent vehicle control systems. Journal of Physics: Conference series: International conference on actual issues of mechanical engineering, 2021, 012123 p., DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012123. EDN SLARYS.
46. Торжков М.С. Создание миварной экспертной системы для выполнения этических аспектов искусственного интеллекта для скоринга кредитования / М.С. Торжков, Ю.П. Королева, А.В. Балдин и др. // Проблемы искусственного интеллекта, 2024. – № 4(35). – С. 139-150. – DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-139-150. – EDN BHOQXX.
47. Подопригорова Н.С. Разработка миварной экспертной системы для выбора алгоритма консенсуса распределённых реестров / Н.С. Подопригорова, С.А. Козырев, С.С. Подопригорова и др. // Проблемы искусственного интеллекта, 2024. – № 4(35). – С. 126-138. – DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-126-138. – EDN AVXOTO.
48. Варламов О.О. Разработка миварной экспертной системы для планирования ресурсов цеха и анализа отклонений / О.О. Варламов., С. Чжан, А.В. Балдин и др. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2024. – Т. 12. – № 3(46). – DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.017. – EDN LLQDAT.
49. Антонова А.А. Миварная экспертная система для поддержки принятия решений персонала на производстве планетарных редукторов / А.А. Антонова, О.О. Варламов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2025. – Т. 13. – № 1(48). – DOI 10.26102/2310-6018/2025.48.1.042. – EDN UNOLXM.
50. Редько А.В. Миварная экспертная система для подбора электродвигателя / А.В. Редько, И.С. Тришкин, О.О. Варламов и др. // Системы управления и информационные технологии, 2025. – № 1(99). – С. 94-99. – EDN CNPDCU.
51. МИВАР'24: Сборник научных статей, Москва, 18–20 апреля 2024 года. Москва: ИНФРА-М, 2024. – 571 с. – EDN GIQZMD.

Варламов Олег Олегович. Профессор, доктор технических наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор кафедры ИУ5 Системы обработки информации и управления. Научный руководитель Научно-исследовательской инициативы (НИИ) МИВАР на кафедре ИУ5 в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Основные направления исследований автора: комплексные системы искусственного интеллекта, кибернетика, информатика, миварные технологии логического искусственного интеллекта, базы знаний, экспертные системы, системы поддержки принятия решений, понимание текстов на русском языке, понимание образов, системы принятия решений для автономных робототехнических комплексов. AuthorID: 143177, SPIN: 7983-9762, Google Scholar kDy5GIMAAAAJ, ORCID: 0000-0002-2858-1383, Scopus: 57195354995, ResearcherID: U-4856-2017, ovar@yandex.ru; ovarlamov@gmail.com, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, кафедра ИУ5.

UDC 004.891 + 004.896 + 007.52 + 681.518 + 65.011.56

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.003

Application of mivar technologies of logical artificial intelligence for creation of smart manufacturing systems

Oleg O. Varlamov

BMSTU, SI MIVAR,

Russia, Moscow, ovar@yandex.ru

Abstract. The experience of scientific research and practical work has shown that in the field of smart manufacturing systems it is possible and advisable to create mivar expert systems (MES) to increase the intellectualization of decision-making and information processing. This allows to improve the quality of manufactured products and move to a new level of creation of automated control systems for manufacturing systems. To create full-fledged MES in the field of smart manufacturing systems, it is necessary to carry out diverse scientific and practical work, and by people of different specialties, who must be united into a single team. The evolutionary development of each mivar expert system of smart manufacturing systems is ensured by the fact that the MES has the property of evolution and at any time any rule can be added, changed or deleted. This has been repeatedly verified during the implementation of group scientific projects, when new rules for added decision-making and information processing processes for various production systems were evolutionarily added.

Keywords: mivar, artificial intelligence, mivar expert systems, mechanical engineering, intellectualization of decision-making and information processing, smart production systems, MOGAN, MIPRA, Wi!Mi, Razumator, Big Knowledge, robots, modeling, training, mechanical engineering AI

References

1. Varlamov O.O. Mivarnyye tekhnologii kak nekotoryye napravleniya iskusstvennogo intellekta [Mivar technologies as some directions of artificial intelligence]. Problemy iskusstvennogo intellekta [Problems of artificial intelligence], 2015, no. 1(1), pp. 23-37, EDN WDNPGZ.
2. Varlamov O.O. Avtomatizatsiya umstvennoy deyatel'nosti lyudey cherez logicheskiy iskusstvennyy intellekt kak fundamental'nyy mekhanizm razvitiya ili gibeli chelovechestva [Automation of mental activity of people through logical artificial intelligence as a fundamental mechanism for the development or death of mankind]. Problemy iskusstvennogo intellekta [Problems of artificial intelligence], 2017, no. 3(6), pp. 23-31, EDN YNTRSV.
3. Varlamov O.O. Evolyucionnye bazy dannyh i znaniy dlya adaptivnogo sinteza intellektual'nyh sistem. Mivarnoe informacionnoe prostranstvo [Evolutionary databases and knowledge for adaptive synthesis of intelligent systems. Mivar information space]. M.: "Radio i svyaz" [M.: Radio and communication], 2002, 288 p., EDN RWTCOP.
4. Varlamov O.O. Wi!Mi expert system shell as the novel tool for building knowledge-based systems with linear computational complexity. International review of automatic control, 2018, vol. 11, no. 6, pp. 314-325, DOI: 10.15866/ireaco.v11i6.15855, EDN UNUCCC.
5. Shadrin S.S., Ivanov A.M., Varlamov O.O. Experimental autonomous road vehicle with logical artificial intelligence. Journal of advanced transportation, 2017, vol. 2017, pp. 2492765, DOI: 10.1155/2017/2492765, EDN XNTRKD.
6. Varlamov O. "Brains" For Robots: Application of the mivar expert systems for implementation of autonomous intelligent robots. Big Data Research, 2021, vol. 25, pp. 100241, DOI: 10.1016/j.bdr.2021.100241, EDN HRYLWL.
7. Varlamov O., Aladin D. A New generation of rules-based approach: Mivar-based Intelligent Planning of Robot Actions (MIPRA) and brains for autonomous robots. Machine intelligence research, 2024, vol. 21, no. 5, pp. 919-940, DOI 10.1007/s11633-023-1473-1, EDN TSPUOP.
8. Sergushin G.S., Varlamov O.O., Chibirova M.O. et al. Issledovaniye vozmozhnostey informatsionnogo modelirovaniya slozhnykh sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami na osnove mivarnykh tekhnologiy [Study of the possibilities of information modeling of complex control systems of technological processes based on mivar technologies]. Avtomatizatsiya i upravleniye v tekhnicheskikh sistemakh [Automation and control in technical systems], 2013, no. 2(4), pp. 51-66, EDN RDWXUT.
9. Vladimirov A.N., Varlamov O.O., Nosov A.V. et al. Primeneniye mnogoprotsessornogo vychislitel'nogo klastera NIIR dlya rasparallelivaniya algoritmov v nauchno-tekhnicheskikh i vychislitel'nykh zadachakh [Application of the NIIR multiprocessor computing cluster for parallelization of algorithms in scientific, technical and computational problems]. Trudy NII Radio [Proceedings of the Research Institute of Radio], 2009, no.3, pp. 120-123, EDN KYNLNN.

10. Semenov A.A., Varlamov O.O. Issledovanie sposobov podbora reklamnykh kampanij na osnove sravneniya mnogomernykh vektorov [Research on methods for selecting advertising campaigns based on comparison of multidimensional vectors]. Problemy iskusstvennogo intellekta [Problems of artificial intelligence], 2020, no. 1 (16), pp. 89-104, EDN UEBEPL.
11. Varlamov O.O., Sandu R.A., Vladimirov A.N. et al. Mivarnyy metod logiko-vychislitel'noy obrabotki informatsii dlya ASU, trenazherov, ekspertnykh sistem real'nogo vremeni i arkhitektur, oriyentirovannykh na servisy [Mivar method of logical-computational information processing for automated control systems, simulators, real-time expert systems and service-oriented architectures]. Iskustvennyy intellekt [Artificial Intelligence], 2010, no. 4, pp. 558-565, EDN TIFHLT.
12. Mashchenko E.I., Karpov D.K., Varlamov O.O. et al. Sozdaniye mivarnoy ekspertnoy sistemy dlya ponimaniya obrazov i prinyatiya resheniy pri obnaruzhenii padeniy lyudey [Creation of a mivar expert system for understanding images and making decisions when detecting people falling]. Problemy iskusstvennogo intellekta [Problems of artificial intelligence], 2024, no. 4 (35), pp. 88-100, DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-88-100, EDN FGLHZZ.
13. Shen Q., Gong Sh., Varlamov O.O. et al. Dinamicheskoye planirovaniye trayektorii robota na osnove semanticheskogo obnaruzheniya ob'yektov s ispol'zovaniyem mivarnoy ekspertnoy sistemy [Dynamic robot trajectory planning based on semantic object detection using a mivar expert system]. Problemy iskusstvennogo intellekta [Problems of artificial intelligence], 2024, no. 4(35), pp. 164-176, DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-164-176, EDN DHVOFC.
14. Varlamov O.O. O sozdanii na osnove mivarnykh sistem prinyatiya resheniy "ROBO!RAZUM" grupp avtonomnykh kombaynov i traktorov dlya sel'skogo khozyaystva [On the creation of autonomous combine harvesters and tractors for agriculture based on mivar decision-making systems "ROBO!MIND"]. Problemy iskusstvennogo intellekta [Problems of artificial intelligence], 2019, no. 2(13), pp. 49-62, EDN AMUYCK.
15. Varlamov O. O. Sozdaniye Bol'shikh Znaniy i rasshireniye oblastey primeneniya mivarnykh tekhnologiy logicheskogo iskusstvennogo intellekta [Creation of Great Knowledge and expansion of the areas of application of mivar technologies of logical artificial intelligence]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 4(32), pp. 30-41, DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.003, EDN THBEWN.
16. Luger J.F. Iskustvennyy intellekt: strategii i metody resheniya slozhnykh problem [Artificial Intelligence: Strategies and Methods for Solving Complex Problems]. 4th ed. M.: Vil'yams [M.: Williams], 2005, 864 p.
17. Rostovtsev Yu.G. Matematicheskie metody i modeli ocenivaniya voenno-politicheskoy obstanovki [Mathematical methods and models for assessing the military-political situation]. MO SSSR [USSR Ministry of Defense], 1986, 312 p.
18. Gavrilova T.A., Khoroshevsky V.F. Bazy znaniy intellektual'nykh sistem [Knowledge bases of intelligent systems]. Sankt-Peterburg: Piter [St. Petersburg: Peter], 2000, 384 p., EDN TGWANT.
19. Ostroukh A.V. Vvedenie v iskusstvennyy intellekt [Introduction to artificial intelligence]. Krasnoyarsk: Scientific-innovative. center, 2020, 250 p.
20. Ostroukh A.V. Intellektual'nye sistemy [Intelligent systems]. Krasnoyarsk: Nauchno-innovatsionnyy tsentr [Krasnoyarsk: Scientific and innovation center], 2020, 316 p.
21. Waterman D. Rukovodstvo po ekspertnym sistemam [Guide to expert systems]. M.: Mir [M.: Mir], 1989, 388 p.
22. Townsend K., Focht D. Proektirovaniye i programmnyaya realizatsiya ekspertnykh sistem na personal'nykh EVM [Design and software implementation of expert systems on personal computers]. M.: Finansy i statistika [M.: Finance and statistics], 1990, 320 p.
23. Giarratano D., Riley G. Ekspertnye sistemy: principy razrabotki i programmirovaniye [Expert systems: principles of development and programming]. 4th ed. M.: Vil'yams [M.: Williams], 2007, 1152 p. EDN QMQTDD.
24. Giarratano J.C., Riley G.D. Expert systems: principles and programming, 4-th edition. Course Technology, 2004.
25. Luger F.G. Artificial Intelligence: Structure and Strategies for complex problem solving. Boston: Pearson, 2009.
26. Popov E.V. Iskustvennyy intellekt: ekspertnye sistemy [Artificial intelligence: expert systems]. M.: Nauka [M.: Nauka], 1990.
27. Ekspertnye sistemy. Bazy znaniy i dannykh. Materialy seminarov [Expert systems. Knowledge and data bases. Seminar materials]. Pod ruk. E.V. Popova, M.: TSRDZH [Under the guidance of. E.V. Popova. M.: CRJ], 1992, 171 p.
28. Kirsanov B.S., Popov E.V. Otechestvennyye obolochki ekspertnykh sistem [Domestic shells of expert systems]. Spravochnik po iskusstvennomu intellektu, M.: Radio i svyaz', [Handbook of artificial intelligence, M.: Radio and communication], 1990, vol. 1, pp. 369-388.
29. Popov E.V., Fominykh I.B., Kisel E.B., Shapot M.D. Statisticheskie i dinamicheskie ekspertnye sistemy [Statistical and dynamic expert systems]. M.: Finansy i statistika [M.: Finance and statistics], 1996.

30. Yashin A.M. Razrabotka ekspertnyh sistem [Development of expert systems]. L.: LPI, 1990.
31. Spravochnik po iskusstvennomu intellektu v 3-h t. [Handbook of artificial intelligence in 3 volumes]. Ed. E.V. Popova, D.A. Pospelov. M.: Radio i svyaz' [M.: Radio and communication], 1990.
32. Theize A., Gribomon P., Louis J. et al. Logicheskij podhod k iskusstvennomu intellektu: ot klassicheskoy logiki k logicheskomu programmirovaniyu [Logical approach to artificial intelligence: from classical logic to logic programming]. M.: Mir [M.: Mir], 1990, 432 p.
33. Chandru V., Hooker J. Optimization methods for logical inference. New York: Wiley, 1999.
34. Russel S. J., Norvig P. Artificial Intelligence: a Modern Approach (3rd ed.). Boston: Pearson, 2010.
35. Sadik A.R., Urban B. An ontology-based approach to enable knowledge representation and reasoning. Future Internet, 2017, vol. 9(4), 90, DOI: 10.3390/fi9040090.
36. Forgy Ch. A network match routine for production systems. Working Paper, 1974.
37. Forgy Ch. On the efficient implementation of production systems. Ph. D. Thesis, Carnegie-Mellon University, 1979.
38. Forgy Ch. Rete: A fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem. Artificial Intelligence, 1982, 19, pp. 17-37.
39. Kotov V. E. Seti Petri [Petri nets]. M.: Nauka [M.: Nauka], 1984, 160 p.
40. Peterson J. Teoriya setej Petri i modelirovanie sistem [Theory of Petri nets and modeling of systems]. Moscow, 1984, 264 p.
41. Arshinsky L.V. Mnogoznachnye logiki s vektornoj semantikoj [Multi-valued logics with vector semantics]. Vostochno-Sibirskiy institut MVD Rossii. Irkutsk, 2003. 46 s. Dep v VINITI 13.02.2003, no. 281-V2003 [East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. Irkutsk, 2003. 46 p. Deposit in VINITI 02/13/2003, №281-B2003]. EDN QJBXBJ..
42. Arshinsky L.V. Interval'noe ocenivanie istinnosti v sistemah avtomatizirovannyh rassuzhdenij na osnove VTF-logik [Interval truth estimation in automated reasoning systems based on VTF logics]. IV mezhdunarodnaya konferentsiya "Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya" SICPRO'05: trudy. Moskva. IPU RAN im. V.A. Trapeznikova [IV International Conference "System Identification and Control Problems" SICPRO'05: proceedings. Moscow. IPU RAS named after. V.A. Trapeznikova], 2005, pp. 1061-1074.
43. Arshinsky L.V. Organizatsiya znaniy v sisteme modelirovaniya pravdopodobnyh rassuzhdenij "Geraklit" [Organization of knowledge in the system for modeling plausible reasoning "Heraclitus"]. XVII Baykal'skaya Vserossiyskaya konferentsiya "Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii": trudy. T. 3. Irkutsk. ISEM SO RAN [XVII Baikal All-Russian Conference "Information and mathematical technologies in science and management": proceedings. vol. 3. Irkutsk. ISEM SB RAS], 2012, pp. 19-25.
44. Arshinsky L.V. Osobennosti raboty mashiny vyvoda sistemy modelirovaniya pravdopodobnyh rassuzhdenij "Geraklit" [Features of the operation of the inference engine of the system for modeling plausible reasoning "Heraclitus"]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2016, no. 2, pp. 18-29, EDN WZBLJV.
45. Chuvikov D. A., Aladin D.V., Adamova L.E. et al. A new method for creating Mivar knowledge bases in tabular-matrix form for ground intelligent vehicle control systems. Journal of Physics: Conference series: International conference on actual issues of mechanical engineering, 2021, 012123 p., DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012123. EDN SLARYS.
46. Torzhkov M.S., Koroleva Yu.P., Bal'din A.V. et al. Sozdaniye mivarnoy ekspertnoy sistemy dlya vypolneniya eticheskikh aspektov iskusstvennogo intellekta dlya skoringa kreditovaniya [Creation of a mivar expert system for implementing ethical aspects of artificial intelligence for credit scoring]. Problemy iskusstvennogo intellekta [Problems of artificial intelligence], 2024, no. 4(35), pp. 139-150, DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-139-150, EDN BHOQXX.
47. Podoprigozova N.S., Kozyrev S.A., Podoprigozova S.S. et al. Razrabotka mivarnoy ekspertnoy sistemy dlya vybora algoritma konsensusa raspredelennykh reyestrov [Development of a mivar expert system for selecting a consensus algorithm for distributed ledgers]. Problemy iskusstvennogo intellekta [Problems of artificial intelligence], 2024, no. 4(35), pp. 126-138, DOI: 10.24412/2413-7383-2024-4-126-138, EDN AVXOTO.
48. Varlamov O.O., Zhang S., Bal'din A.V. et al. Razrabotka mivarnoy ekspertnoy sistemy dlya planirovaniya resursov tsekha i analiza otkloneniy [Development of a mivar expert system for workshop resource planning and deviation analysis]. Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii [Modeling, optimization and information technology], 2024, vol. 12, no. 3(46). DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.017. EDN LLQDAT.
49. Antonova A.A., Varlamov O.O. Mivarnaya ekspertnaya sistema dlya podderzhki prinyatiya resheniy personala na proizvodstve planetarnykh reduktorov [Mivar expert system to support personnel decision-making in the production of planetary gearboxes]. Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii [Modeling,

- optimization and information technology], 2025, vol. 13, no. 1(48), DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.042, EDN UHOLXM.
50. Redko A.V., Trishkin I.S., Varlamov O.O. et al. Mivarnaya ekspertnaya sistema dlya podbora elektrodvigatelya [Mivar expert system for electric motor selection]. Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii [Control systems and information technologies], 2025, no. 1(99), pp. 94-99, EDN CNPDCU.
51. MIVAR'24: Sbornik nauchnyh statej [Collection of scientific articles], Moscow, 18-20 April 2024. Moscow: INFRA-M, 2024, 571 p., EDN GIQZMD.

Varlamov Oleg Olegovich. Professor, Doctor of Technical Sciences, BMSTU, professor of the Department of Information Processing and Management Systems (IU5). Scientific director of the Research Initiative (SRI) MIVAR at the department of IU5 at BMSTU. The author's main areas of research: complex artificial intelligence systems, cybernetics, computer science, mivar technologies of logical artificial intelligence, knowledge bases, expert systems, decision support systems, understanding texts in Russian, understanding images, decision-making systems for autonomous robotic systems. AuthorID: 143177, SPIN: 7983-9762, Google Scholar: kDy5GIMAAAAJ, ORCID: 0000-0002-2858-1383, Scopus: 57195354995, ResearcherID: U-4856-2017, ovar@yandex.ru, ovarlamov@gmail.com, 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya st., 5, building 1, Dep. IU5.

Статья поступила в редакцию 15.04.2025; одобрена после рецензирования 04.05.2025; принята к публикации 05.05.2025.

The article was submitted 04/15/2025; approved after reviewing 05/04/2025; accepted for publication 05/05/2025.

Математическое моделирование и его применение в научных исследованиях

УДК 533.697.2

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.004

Численное моделирование колебательных режимов трансзвукового течения воздуха в изогнутом канале

Кузьмин Александр Григорьевич

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, a.kuzmin@spbu.ru

Аннотация. При сверхзвуковой скорости потока воздуха на входе в воздухозаборник или межлопаточный канал турбомшины, как известно, происходит формирование ударных волн, на которых параметры потока изменяются скачкообразно. Положение ударных волн может резко изменяться при малых изменениях условий на входе и выходе, при этом могут наблюдаться разные режимы и гистерезис течения. Вопросы перехода между разными режимами были детально изучены для двумерных, осесимметричных и пространственных воздухозаборников конфузорно-диффузорного типа, а также для изогнутых каналов прямоугольного поперечного сечения при стационарных и нестационарных изменениях параметров сверхзвукового потока на входе. В настоящей работе рассматривается двумерный канал с 9%-м изгибом и достаточно большой длиной участка, расположенного ниже по течению от изгиба. Проведено численное исследование турбулентного трансзвукового течения при заданных колебаниях давления на выходе из канала. Решения системы уравнений Рейнольдса, описывающих параметры воздуха и структуру течения, получены с помощью вычислительного пакета ANSYS-18.2. Полученные решения показывают существование разных режимов при одном и том же стационарном или колебательном давлении в выходном сечении канала. Установлены условия перехода от режима с многократным отражением наклонных ударных волн от стенок к режиму с ударной волной, расположенной у входа в канал. Показано, что обратного перехода не наблюдается при вариациях давления в выходном сечении канала; для такого перехода необходимо увеличение числа Маха или давления в набегающем потоке.

Ключевые слова: численное моделирование, трансзвуковое течение, колебания, неединственность

Цитирование: Кузьмин А.Г. Численное моделирование колебательных режимов трансзвукового течения воздуха в изогнутом канале / А.Г. Кузьмин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2(38). – С. 47-56. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.004.

Введение. Вопросы формирования и распространения ударных волн (скачков уплотнения) в изогнутых каналах представляют практический интерес в связи с необходимостью совершенствования сверхзвуковых компрессоров и воздухозаборников воздушно-реактивных двигателей летательных аппаратов [1-3]. При сверхзвуковых скоростях набегающего воздушного потока положение скачков уплотнения и дозвуковых зон в канале может резко изменяться при малых изменениях условий на входе в канал и выходе из него. Неустойчивость положения скачков может приводить к разным режимам течения при одних и тех же условиях на входе и выходе. В [3, 4] представлены обзоры численных и экспериментальных исследований течений в воздухозаборниках при изменениях параметров набегающего потока, а также дано подробное описание структуры течения на режимах:

А) с системой косых скачков, достигающих минимального поперечного сечения канала, (режим “запущенного” воздухозаборника) и

Б) с почти прямым скачком, расположенным у входа в канал (режим “незапуска” воздухозаборника).

Аналогичные исследования проводились для течений в изогнутых каналах с плавным или резким поворотом стенок [5-7].

В ряде работ выполнено изучение воздухозаборников регулируемой геометрии, где было проанализировано влияние изменений геометрии на структуру течения, расходные характеристики и потери полного давления [8-10].

Отдельный интерес представляют исследования течений в воздухозаборниках при изменениях давления в выходном сечении, т.е. противодавления. Колебания противодавления могут возникать вследствие неустойчивости процессов в расположенной ниже по течению камере сгорания. Существенное повышение противодавления вызывает переход от вышеуказанного режима А к режиму Б, следствием чего становится резкое уменьшение расхода воздуха, поступающего в камеру сгорания, и падение тяги двигателя. Для предупреждения такого перехода при проектировании воздухозаборников выбирается достаточно большая длина его диффузорной части, расположенной ниже по течению от минимального сечения [2].

В [11] для осесимметричных воздухозаборников выполнено численное исследование структуры течения и потерь полного давления, а также установлены пределы изменения противодавления, которые не оказывают влияния на работу “запущенного” воздухозаборника.

Численное моделирование режимов незапуска и повторного запуска двумерного сверхзвукового воздухозаборника при быстрых изменениях противодавления проведено в [12], где проанализировано влияние времени и величины падения давления на характеристики потока и особенности повторного запуска.

В [13] выполнено экспериментальное исследование влияния противодавления на течение в канале, нижняя стенка которого имеет изгиб 8° . Визуализация течения шлирен-методом, а также методом лазерного рассеяния наночастиц, показала присутствие Маховской конфигурации ударных волн и значительного отрыва погранслоя на всех режимах течения. Был также выявлен заметный гистерезис в процессе смены режимов.

В настоящей работе проводится численное исследование влияния противодавления на течение в канале с изгибом стенок 9° , для которого в [6] изучалось влияние изменения параметров на входе. Рассматриваются как стационарные, так и нестационарные изменения противодавления. В рамках используемой модели получены характеристики устойчивости разных режимов течения (которые могут несколько отличаться от свойств реального течения).

1. Постановка задачи и численный метод. Схема расчетной области и профиль канала показаны на рис. 1. Декартовы координаты передних кромок нижней и верхней стенок равны $x=-68$, $y=0$ и $x=-28$, $y=30$, соответственно (здесь и далее все размеры даны в мм). Верхняя стенка имеет излом в 9° при $x=0$, а изгиб нижней стенки на угол 9° реализуется по дуге радиуса 190,6 на участке $-7 \leq x \leq 23$. Высота поперечного сечения канала перед изгибом составляет $h_1=30$, высота поперечного сечения после изгиба $h_2=28,8$, координата выходного сечения $x_{\text{вых}}=130$.

На входной границе $\Gamma_{\text{вх}}$ расчетной области задается число Маха набегающего сверхзвукового потока $M_\infty=1,6$, угол атаки $\alpha=-5^\circ$, статическое давление $p_\infty=8 \times 10^4$ Па, статическая температура $T_\infty=252$ К и уровень турбулентности 1%. Компоненты скорости вычисляются по заданным M_∞ и α с помощью известных соотношений $U_\infty=M_\infty a_\infty \cos \alpha$, $V_\infty=M_\infty a_\infty \sin \alpha$, где $a_\infty=(\gamma R T_\infty)^{1/2}$ – скорость звука, $R=c_p-c_v$ – газовая постоянная для воздуха, $c_v=c_p/\gamma$. Воздух рассматривается как совершенный газ с постоянной адиабаты $\gamma=1,4$ и удельной теплоемкостью при постоянном давлении $c_p=1004,4$ Дж/(кг×К) [14].

На выходной границе $\Gamma_{\text{вых}}$ расчетной области вне канала ставится условие сверхзвукового режима истечения. В выходном сечении канала $x=130$ на тех участках, где скорость потока дозвуковая (в частности, в пограничном слое вблизи стенок), задается статическое давление $p_{\text{вых}}$ и температура $T_{\text{вых}}=260$ К. На стенках используются условия прилипания и адиабатичности. Начальными условиями являются параметры набегающего потока или поле течения, полученное для других значений $p_{\text{вых}}$.

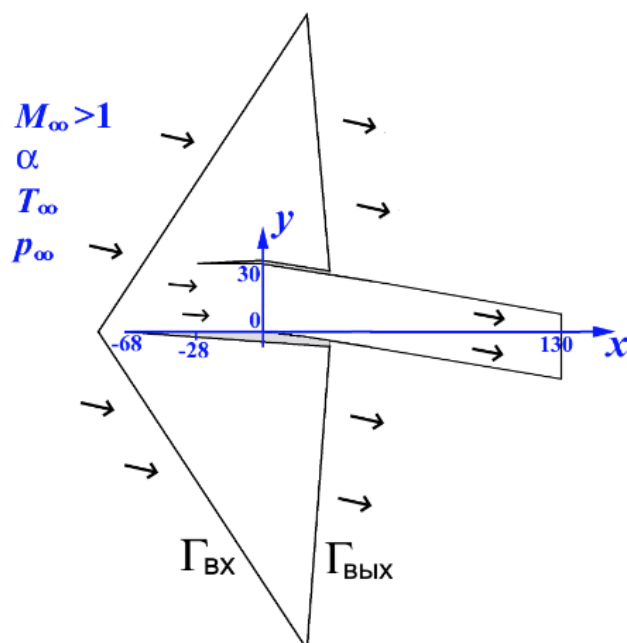


Рис. 1. Схема расчетной области

Для численного моделирования турбулентного течения используется система нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, относительно x - и y -компонент скорости $U(x, y, t)$, $V(x, y, t)$, статической температуры $T(x, y, t)$ и статического давления $p(x, y, t)$ [15]:

$$\rho_t + (\rho U)_x + (\rho V)_y = 0, \quad (1)$$

$$(\rho U)_t + (\rho U^2)_x + (\rho UV)_y = -p_x + \tau_x^{xx} + \tau_y^{xy}, \quad (2)$$

$$(\rho V)_t + (\rho UV)_x + (\rho V^2)_y = -p_y + \tau_x^{yx} + \tau_y^{yy}, \quad (3)$$

$$[\rho(c_v T + (U^2 + V^2)/2)]_t + [\rho U(c_p T + (U^2 + V^2)/2)]_x + [\rho V(c_p T + (U^2 + V^2)/2)]_y = (kT_x + U\tau^{xx} + V\tau^{xy} + \sigma^x)_x + (kT_y + U\tau^{yx} + V\tau^{yy} + \sigma^y)_y, \quad (4)$$

где t – время, нижние индексы означают частные производные по соответствующим переменным, плотность ρ связана с давлением p и температурой T посредством уравнения состояния $p = \rho RT$. В системе (1)-(4) параметр k , вектор (σ^x, σ^y) и тензор $(\tau^{xx}, \tau^{xy}, \tau^{yx}, \tau^{yy})$ определяют тепловые потоки и турбулентную вязкость, которые можно выразить через основные переменные U, V, T, p при помощи той или иной модели турбулентности.

Решения системы (1)-(4) при вышеуказанных граничных и начальных условиях были получены с помощью программного комплекса ANSYS-18.2 CFX [16]. Использовался решатель второго порядка точности, основанный на методе конечных объемов и схеме повышенной разрешающей способности для дискретизации конвективных слагаемых [17]. Дискретизация по времени осуществлялась с помощью неявной противопотоковой схемы Эйлера.

В качестве модели турбулентности была выбрана модель $k-\omega$ SST, основанная на решении двух дифференциальных уравнений с частными производными первого порядка относительно кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации вихрей [18,19]. Вычислительная сетка состояла из 970683 элементов, представлявших собой четырехугольные ячейки в пограничном слое на стенках канала и треугольные ячейки в остальной области. Безразмерное расстояние y^+ от стенки до центра пристенной ячейки было в пределах $0,5 < y^+ < 1,2$, кроме узких участков нижней стенки где оно снижалось до 0,15. Применение более мелких сеток в тестовых расчетах показало, что повышения точности решений при этом не происходит. В расчетах использовались глобальные шаги по времени

$\Delta t = 2 \times 10^{-6}$ с, при этом среднеквадратичное (по ячейкам) число Куранта-Фридрихса-Леви не превышало 8.

2. Результаты расчетов при фиксированном значении давления в выходном сечении канала. Численные решения сформулированной начально-краевой задачи показали сходимость во времени параметров турбулентного течения к стационарным значениям $U(x,y)$, $V(x,y)$, $T(x,y)$, $p(x,y)$ при заданных стационарных граничных условиях. При этом для противодавлений $1,7 \times 10^5 \text{ Па} \leq p_{\text{вых}} \leq 1,9 \times 10^5 \text{ Па}$ могут реализовываться разные режимы течения в зависимости от выбранных начальных условий. Например, на рис. 2а показаны контуры числа Маха, полученные путем расчета течения при $p_{\text{вых}} = 1,8 \times 10^5 \text{ Па}$ и начальных значениях искомых величин, равных параметрам набегающего потока U_∞ , V_∞ , T_∞ , p_∞ во всей расчетной области. На рис. 2б показано другое стационарное решение, которое получено путем проведения расчета сначала для большего давления $p_{\text{вых}} = 2,0 \times 10^5 \text{ Па}$ и затем использования полученного решения, как начального условия для расчета при $p_{\text{вых}} = 1,8 \times 10^5 \text{ Па}$.

Для количественной характеристики положения ударных волн УВ₁ и УВ₂, показанных на рис. 2, будем использовать значения их x -координат $x_{\text{ув}}$ на горизонтали $y=15$. Кривая 1 на рис. 3 иллюстрирует положение ударной волны УВ₁ при разных $p_{\text{вых}}$ на режиме А, на котором УВ₁ находится у изгиба канала (“проглоченная” ударная волна). Этот режим реализуется для давлений $1,7 \times 10^5 \text{ Па} < p_{\text{вых}} \leq 1,9 \times 10^5 \text{ Па}$ при использовании начальных условий, совпадающими с параметрами набегающего потока. Если $p_{\text{вых}}$ превышает $1,9 \times 10^5 \text{ Па}$, то расчеты показывают, что происходит “выбивание” УВ₁ из канала и переход на режим Б, на котором УВ₁ расположена у входа в канал.

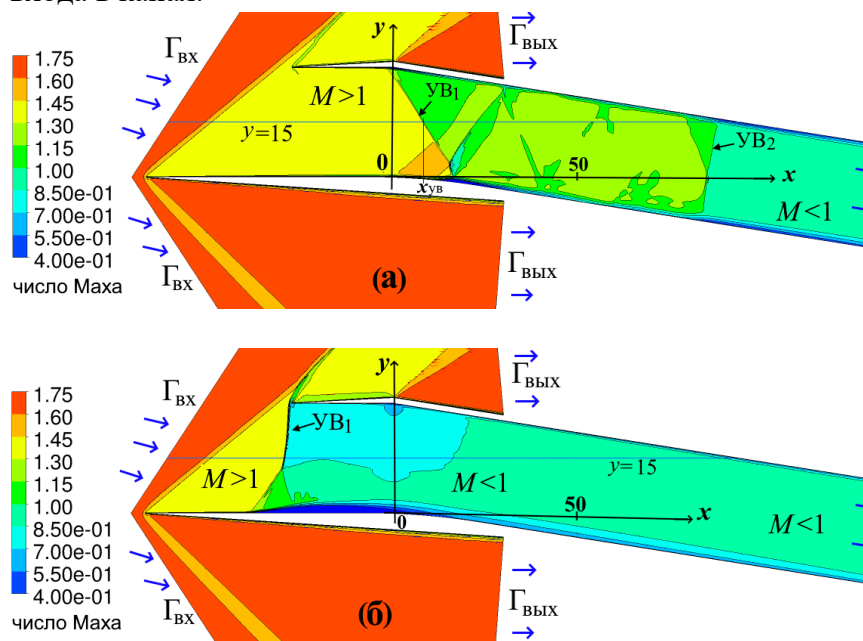


Рис. 2. Распределение числа Маха потока $M(x,y)$ при $p_{\text{вых}} = 1,8 \times 10^5 \text{ Па}$, $M_\infty = 1,6$:

(а) режим А с ударными волнами за изгибом канала, (б) режим Б с “выбитой” ударной волной УВ₁, расположенной у входа в канал

Кривая 2 на рис. 3 иллюстрирует положение ударной волны УВ₁ на режиме Б, который реализуется при расчете течения сначала для давлений в интервале $1,9 \times 10^5 \text{ Па} < p_{\text{вых}} \leq 2,0 \times 10^5 \text{ Па}$, и затем пошагового уменьшения $p_{\text{вых}}$ до $1,7 \times 10^5 \text{ Па}$ с использованием полученного решения на каждом шаге как начального условия для следующего шага.

При $p_{\text{вых}} < 1,7 \times 10^5 \text{ Па}$ скорость потока оказывается сверхзвуковой почти во всем выходном сечении канала, кроме небольшой зоны в пограничном слое у верхней и нижней

стенки. Поэтому дальнейшее уменьшение давления $p_{\text{вых}}$ (которое может передаваться вверх по течению только через этот тонкий пограничный слой) практически не влияет на положение УВ₁.

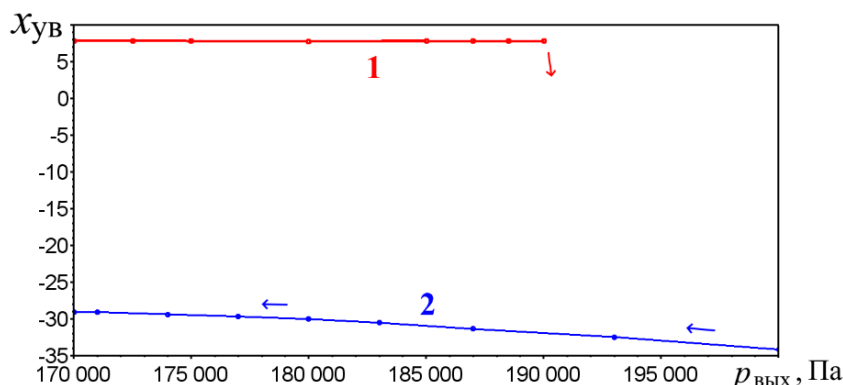


Рис. 3. Зависимость координаты $x_{\text{ув}}$ ударной волны УВ₁ от давления в выходном сечении канала $p_{\text{вых}}$: кривая 1 – режим А, кривая 2 – режим Б

3. Результаты численного моделирования при колебаниях давления в выходном сечении канала. Режим течения Б с ударной волной УВ₁, расположенной у входа в канал, является достаточно устойчивым при задании колебаний давления в выходном сечении канала согласно выражения

$$p_{\text{вых}}(t) = p_{\text{ср}} + A \sin(2\pi t/\tau). \quad (5)$$

В частности, для $p_{\text{ср}} = 1,8 \times 10^5$ Па, периода колебаний $\tau = 0,03$ с и амплитуды $A = 8 \times 10^3$ Па расчеты показали колебания координаты ударной волны УВ₁ в пределах $x_{\text{ув, min}} \leq x_{\text{ув}}(t) \leq x_{\text{ув, max}}$, (рис. 4). Как видно, максимумы и минимумы координаты $x_{\text{ув}}(t)$ отстают, соответственно, от минимумов и максимумов давления $p_{\text{вых}}(t)$ на 0,0035 с.

Такое поведение УВ₁ не претерпевает качественных изменений при увеличении амплитуды A с 8×10^3 Па до 20×10^3 Па и периода τ до 0,06 с для всех $1,7 \times 10^5 \text{ Па} \leq p_{\text{ср}} \leq 2,0 \times 10^5$ Па, как это следует из рис. 5.

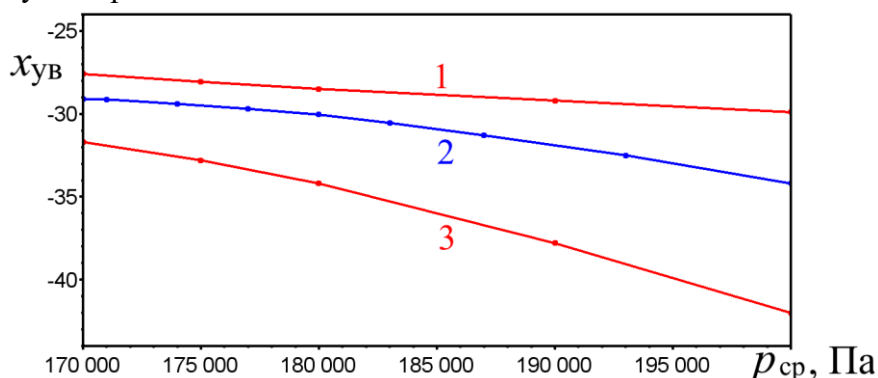


Рис. 5. Режим Б: зависимость максимальных и минимальных значений координаты $x_{\text{ув}}(t)$ ударной волны УВ₁ от среднего давления $p_{\text{ср}}$ в выходном сечении при $A = 20 \times 10^3$ Па и $\tau = 0,06$ с: 1 – $x_{\text{ув, max}}$, 3 – $x_{\text{ув, min}}$, 2 – та же кривая, что и кривая 2 на рис. 3

Режим А с “проглоченной” УВ₁ оказывается более чувствительным к изменениям $p_{\text{вых}}$, чем режим Б. В частности, для амплитуды $A = 8 \times 10^3$ Па, периода $\tau = 0,03$ с и среднего давления $p_{\text{ср}} = 1,8 \times 10^5$ Па расчеты показали, что положение УВ₁ не меняется с возрастанием времени t , вместе с тем наблюдаются существенные колебания ударной волны УВ₂, см. рис. 6. При этом максимумы и минимумы координаты $x_{\text{ув}}(t)$ ударной волны УВ₂ отстают, соответственно, от минимумов и максимумов давления $p_{\text{вых}}(t)$ на 0,005 с.

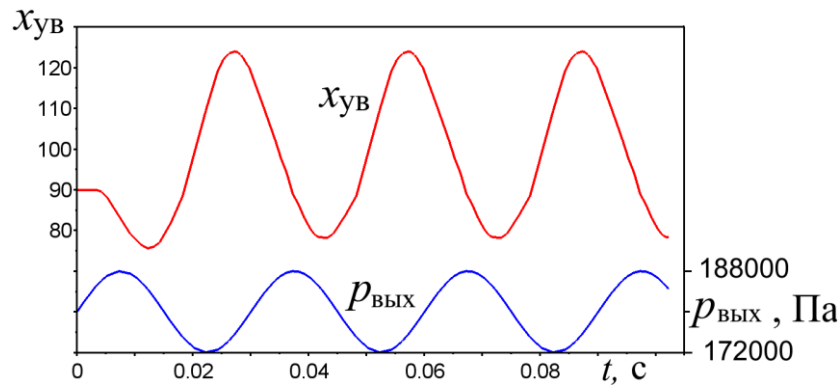


Рис. 6. Режим А: колебания координаты $x_{ув}(t)$ ударной волны УВ₂, расположенной около выхода из канала, при задании давления $p_{вых}(t)$ согласно (5) с

$$p_{ср}=1,8 \times 10^5 \text{ Па}, A=8 \times 10^3 \text{ Па}, \tau=0,03 \text{ с}$$

При $p_{ср}=1,8 \times 10^5$ Па и увеличении амплитуды колебаний давления от $A=8 \times 10^3$ Па до $A=15 \times 10^3$ Па, а также периода от $\tau=0,03$ с до $\tau=0,06$ с, режим А сохраняется, несмотря на то, что максимальное значение давления $p_{вых, \max}=p_{ср}+A=1,95 \times 10^5$ Па превышает предельное значение $1,90 \times 10^5$ Па для данного режима при стационарном задании $p_{вых}$ (см. кривую 1 на рис. 3). Рисунок 7 показывает, что на этом режиме координата $x_{ув2}$ ударной волны УВ₂ монотонно уменьшается при увеличении t от 0 до 0,025 с; это объясняется тем, что $p_{вых}(t)$ превышает $p_{ср}$ в первом полупериоде колебаний $0 < t < 0,03$ с. Координата $x_{ув1}$ ударной волны УВ₁ является неизменной при $0 < t < 0,025$ с, однако она изменяется в интервале

$$0,025 \text{ с} < t < 0,040 \text{ с} \quad (6)$$

вследствие влияния волны повышенного давления, распространяющейся от выходного сечения вверх по течению и достигающей окрестности изгиба канала при $t \approx 0,025$ с. В интервале времени (6) сверхзвуковая область, расположенная за изгибом канала, существенно уменьшается в размерах и локализуется около нижней стенки вместе с замыкающей ее слабой ударной волной УВ₂, см. рис. 8. Отсутствие пересечения УВ₂ с горизонталью $y=15$ в этом случае не позволяет указать координату УВ₂, что иллюстрируется разрывами верхней кривой на рис. 7.

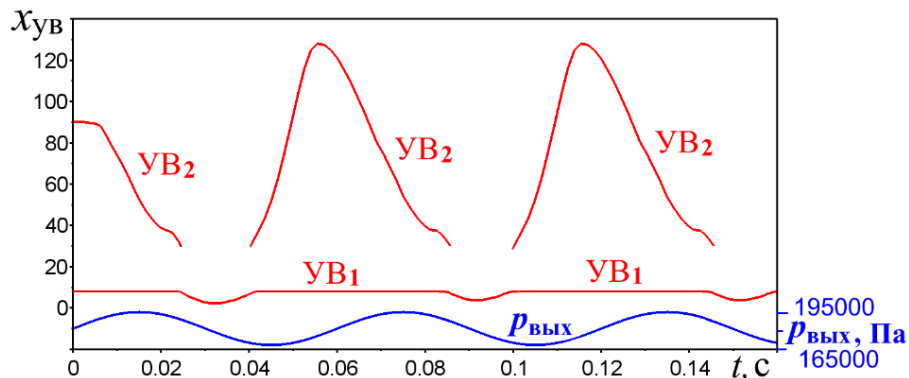


Рис. 7. Режим течения А: зависимость координат $x_{ув}$ ударных волн УВ₁ и УВ₂ от времени при задании давления $p_{вых}$ согласно (5) с $p_{ср}=1,8 \times 10^5$ Па, $A=15 \times 10^3$ Па, $\tau=0,06$ с

Согласно (5), давление $p_{вых}(t)$ становится меньше $p_{ср}$ во втором полупериоде колебаний $0,03 \text{ с} < t < 0,06 \text{ с}$, что приводит к возникновению волны пониженного давления, распространяющейся от выходного сечения канала вверх по течению. Волна пониженного давления вызывает расширение зоны сверхзвуковых скоростей за изгибом и рост ударной волны УВ₂, приводящий к ее пересечению с прямой $y=15$. Это позволяет определять значения координаты $x_{ув2}$ при $0,040 \text{ с} < t < 0,085 \text{ с}$ так же, как и при $t < 0,025 \text{ с}$. Максимум координаты

x_{yB2} наблюдается в момент времени $t=0.055$ с, когда $УВ_2$ расположена наиболее близко к выходному сечению канала.

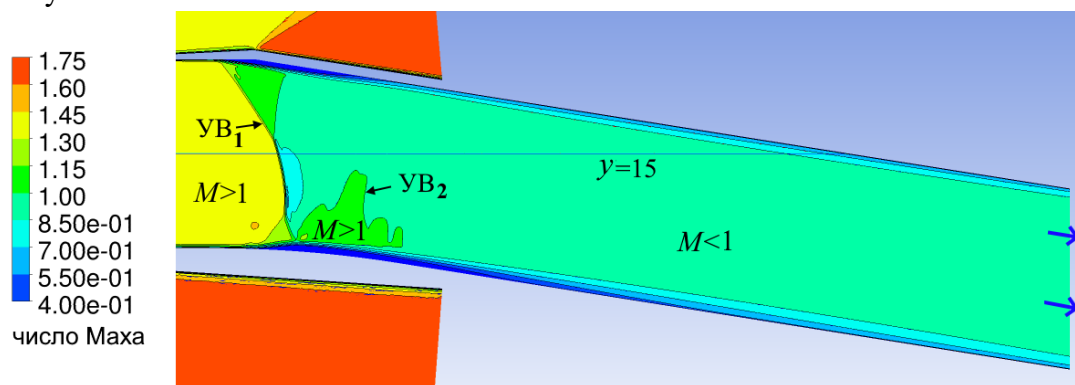


Рис. 8. Фрагмент поля течения на режиме А: распределение числа Маха $M(x, y)$ при $p_{ср}=1,8 \times 10^5$ Па, $A=15 \times 10^3$ Па, $\tau=0,06$ с в момент времени $t=0,03$ с

Как видно из рис. 7, поведение ударных волн при $t > 0,085$ с является периодическим, повторяющим их поведение при $0,025$ с $< t < 0,085$ с.

Аналогичная динамика ударных волн на режиме А наблюдается при увеличении среднего давления $p_{ср}$ в (5) от $1,8 \times 10^5$ Па до $1,81 \times 10^5$ Па с одновременным уменьшением амплитуды A до 14×10^3 Па. Однако если амплитуду A сохранить равной 15×10^3 Па, то происходит переход к режиму Б с “выбитой” ударной волной $УВ_1$, совершающей незначительные колебания около координаты $x=-30$, см. рис. 9.

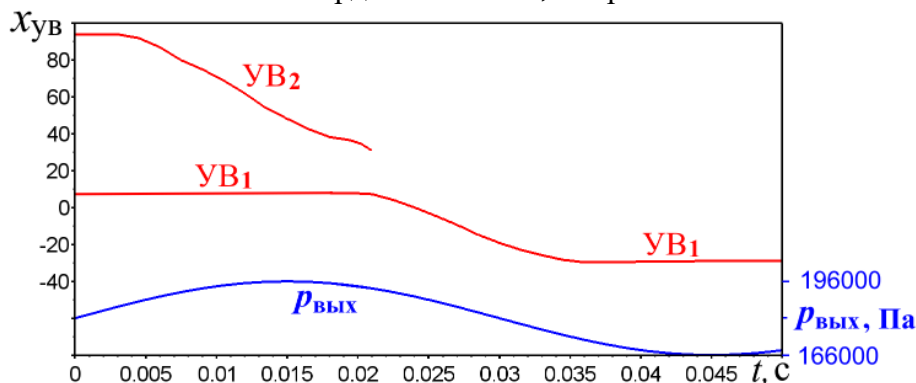


Рис. 9. Переход от режима А к режиму Б: зависимость координат x_{yB} ударных волн $УВ_1$ и $УВ_2$ от времени при задании давления $p_{вых}$ согласно (5) с $p_{ср}=1,81 \times 10^5$ Па, $A=15 \times 10^3$ Па, $\tau=0,06$ с

На рис. 10 представлены границы устойчивости режима А в плоскости параметров ($p_{ср}$, A) для двух значений периода колебаний τ . При возрастании амплитуды A или $p_{ср}$ и пересечении указанных границ происходит переход от режима течения А к режиму Б, то есть “выбивание” $УВ_1$ из канала. Пересечение границ в обратном направлении не приводит к переходу от режима Б к режиму А; для такого перехода требуется повышение числа Маха набегающего потока M_∞ или давления p_∞ с последующим возвращением к исходным значениям $M_\infty=1,6$, $p_\infty=8 \times 10^4$ Па.

Заключение. Проведено численное моделирование турбулентного трансзвукового течения воздуха в изогнутом канале с достаточно большой длиной участка, расположенного ниже по течению от изгиба. Показана возможность существования разных режимов течения, которые устойчивы по отношению к малым стационарным и колебательным изменениям давления $p_{вых}$ на выходе из канала. При достаточно больших амплитудах колебаний давления $p_{вых}$ или достаточно большом его среднем значении $p_{ср}$ происходит переход от режима течения с системой ударных волн, достигающих изгиба канала, к режиму с одной ударной волной,

расположенной у входа. Обратного перехода при уменьшении среднего давления $p_{\text{ср}}$ не происходит. Отсутствует также двойной гистерезис, который наблюдался в том же канале при изменениях числа Маха набегающего потока M_∞ [6].

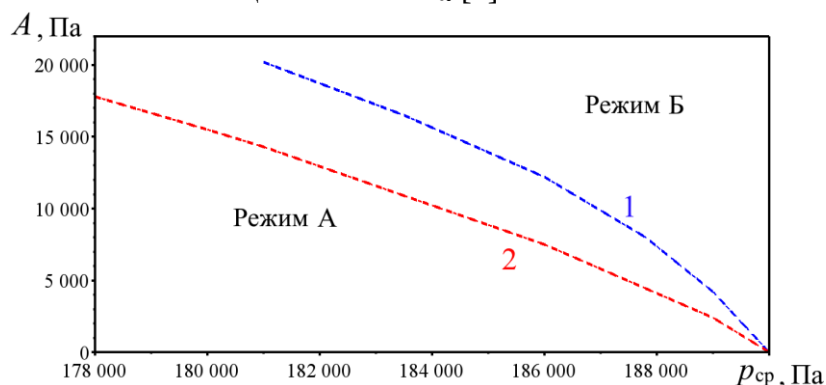


Рис. 10. Границы устойчивости режима А на плоскости $(p_{\text{ср}}, A)$, где $p_{\text{ср}}$ – среднее давление в выходном сечении канала, A – амплитуда колебаний давления; кривая 1 соответствует периоду $\tau=0,06$ с, кривая 2 – периоду $\tau=0,03$ с

Благодарность. Данное исследование выполнено с использованием вычислительных ресурсов Ресурсного Центра "Вычислительный центр СПбГУ" (<http://cc.spbu.ru>), проект № 2304-084.

Список источников

1. Benini E., Venturelli G. Kriging-assisted design optimization of S-shape supersonic compressor cascades. *Aerospace science and technology*, 2016, vol. 58, pp. 275-297, DOI: 10.1016/j.ast.2016.08.021.
2. Пензин В.И. Торможение сверхзвукового потока в каналах / В.И. Пензин – М.: Центр. аэрогидродинамич. ин-т, 2012. – 158 с.
3. Звегинцев В.И. Газодинамические проблемы при работе сверхзвуковых воздухозаборников в нерасчетных условиях (обзор) / В.И. Звегинцев // *Теплофизика и аэромеханика*, 2017. – Т. 24. – № 6. – С. 829-858.
4. Cui T., Wang Y., Liu K., Jin J. Classification of combustor–inlet interactions for airbreathing ramjet propulsion, *AIAA Journal*, 2015, vol. 53, no. 8, pp. 2237-2255, DOI: 10.2514/1.J053378.
5. Kuzmin A. Shock wave instability in a bent channel with subsonic/supersonic exit. *Advances in aircraft and spacecraft science*, 2019, vol. 6(1), pp. 19-30, DOI:10.12989/aas.2019.6.1.019.
6. Kuzmin A. Non-unique regimes of oscillatory transonic flow in bent channels. *Aerospace systems*, 2023, vol. 7, pp. 1-7, DOI: 10.1007/s42401-023-00243-4.
7. Mushtaq N., Gaetani P. Understanding and modeling unstating phenomena in a supersonic inlet cascade, *Physics of Fluids*, 2023, vol. 35, pp. 1-22, DOI: 10.1063/5.0160706.
8. Гунько Ю.П. Экспериментальные характеристики сверхзвукового трехмерного воздухозаборника с регулируемым горлом / Ю.П. Гунько, И.И. Мажуль // *Теплофизика и аэромеханика*, 2013. – Т. 20. – № 1. – С. 49-66.
9. Feng S., Chang J., Zhang Ch. et al. Experimental and numerical investigation on hysteresis characteristics and formation mechanism for a variable geometry dual-mode combustor. *Aerospace science and technology*, 2017, vol. 67, pp. 96-104, DOI: 10.1016/j.ast.2017.03.040.
10. Jin Y., Sun S., Tan H. et al. Flow response hysteresis of throat regulation process of a two-dimensional mixed-compression supersonic inlet. *Chinese journal of aeronautics*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 112-127, DOI: 10.1016/j.cja.2021.06.013.
11. Гутов Б.И. Влияние противодавления на течение в диффузоре сверхзвукового воздухозаборника / Б.И. Гутов, В.И. Звегинцев, А.Ю. Мельников // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2017. – № 49. – С. 18-28.
12. Wang K., Wang J.Y., Huang H.X. et al. Effects of backpressure on unstart and restart characteristics of a supersonic inlet. *The Aeronautical journal*, 2023, vol. 127, iss. 1316, pp. 1774-1792, DOI: 10.1017/aer.2023.19.
13. Zhao Y.L., Zhou Y.Y., Zhao Y.X. Experimental study of the unstart/restart process of a two-dimensional supersonic inlet induced by backpressure. *Journal of applied fluid mechanics*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 415-426, DOI: 10.47176/jafm.15.02.33220.
14. Cengel Y.A., Boles M.A. *Thermodynamics: an engineering approach* (4th ed.). McGraw-Hill College, 2001, 960 p.

15. Tennekes H., Lumley J.L. A First course in turbulence (14th ed.). MIT Press, Cambridge, 1992, 360 p.
16. ANSYS Fluids. Computational fluid dynamics, available at: <https://www.ansys.com/products/fluids> (accessed: 02/18/2024).
17. Barth T.J., Jespersen D.C. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. AIAA Paper, 1989, DOI: 10.2514/6.1989-366.
18. Menter F.R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009, vol. 23, pp. 305-316, DOI: 10.1080/10618560902773387.
19. Menter's Shear stress transport. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Menter%27s_Shear_Stress_Transport (accessed: 02/18/2024).

Кузьмин Александр Григорьевич. Доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, Scopus AuthorID: 7103224489, ORCID: 0000-0002-1699-9600, a.kuzmin@spbu.ru, 198504, Россия, г. Санкт-Петербург.

UDC 533.697.2

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.004

Numerical simulation of oscillatory transonic airflow in a bent channel

Alexander G. Kuzmin

St. Petersburg state university,

Russia, St. Petersburg, a.kuzmin@spbu.ru

Abstract. At a supersonic velocity of the airflow incident on a channel/intake with curved walls, there is the formation of shock waves, across which flow parameters change abruptly. The location of shock waves can change crucially with small changes in flow conditions at the entrance or exit; moreover, the flow can exhibit non-unique regimes and hysteresis. Transitions between the regimes were studied in previous years for two-dimensional, axisymmetric and 3D convergent-divergent intakes, as well as for bent channels of rectangular cross-section at steady or unsteady changes in the supersonic flow parameters at the entrance. In this paper, we consider a two-dimensional 9%-bent channel with a sufficiently long part located downstream of the bend. The turbulent transonic flow is studied numerically under given pressure fluctuations in the exit section of the channel. Solutions of the system of Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, which govern flow parameters and the structure, are obtained with the ANSYS-18.2 software based on the finite element method. The solutions show the occurrence of different regimes at the same steady or oscillatory pressure given at the exit. Conditions for the transition from the regime with multiple reflections of oblique shocks from the walls to the regime with a shock located at the entrance are established. It is shown that the inverse transition cannot be obtained with pressure variations in the exit section of the channel; in order to perform such a transition, one needs an increase in the inflow Mach number or pressure.

Keywords: numerical simulation, transonic flow, oscillations, non-uniqueness

Acknowledgements. This research was performed using computational resources provided by the Computational Center of St. Petersburg State University (<http://cc.spbu.ru>), project no. 2304-084.

References

1. Benini E., Venturelli G. Kriging-assisted design optimization of S-shape supersonic compressor cascades. Aerospace science and technology, 2016, vol. 58, pp. 275-297, DOI: 10.1016/j.ast.2016.08.021.
2. Penzin V.I. Tormozhenie sverkhzvukovogo potoka v kanalah [Supersonic flow deceleration in channels]. M.: Tsentr. aerogidrodinamich. in-t [Moscow, Central aerohydrodynamic institute], 2012, 158 p.
3. Zvegintsev V.I. Gazodinamicheskie problemi pri rabote sverkhzvukovikh vozdukhosbornikov v neraschetnikh usloviyakh (obzor) [Gas-dynamic problems in the operation of supersonic air intakes in off-design conditions (review)]. Teplofizika i aeromekhanika [Thermophysics and aeromechanics], 2017, vol. 24, no. 6, pp. 829-858.

4. Cui T., Wang Y., Liu K., Jin J. Classification of combustor–inlet interactions for airbreathing ramjet propulsion. *AIAA Journal*, 2015, vol. 53, no. 8, pp. 2237-2255, DOI: 10.2514/1.J053378.
5. Kuzmin A. Shock wave instability in a bent channel with subsonic/supersonic exit. *Advances in aircraft and spacecraft science*, 2019, vol. 6(1), pp. 19-30, DOI:10.12989/aas.2019.6.1.019.
6. Kuzmin A. Non-unique regimes of oscillatory transonic flow in bent channels. *Aerospace systems*, 2023, vol. 7, pp. 1-7, DOI: 10.1007/s42401-023-00243-4.
7. Mushtaq N., Gaetani P. Understanding and modeling unstating phenomena in a supersonic inlet cascade, *Physics of Fluids*, 2023, vol. 35, pp. 1-22, DOI: 10.1063/5.0160706.
8. Gunko Yu.P., Mazhul I.I. Eksperimentalnie kharakteristiki sverkhzvukovogo tryokhmernogo vozdukhobornika s reguliruemim gorlom [Experimental characteristics of a supersonic three-dimensional air intake with an adjustable throat]. *Teplofizika i aeromekhanika [Thermophysics and aeromechanics]*, 2013, vol. 20, no. 1, pp. 49-66.
9. Feng S., Chang J., Zhang Ch. et al. Experimental and numerical investigation on hysteresis characteristics and formation mechanism for a variable geometry dual-mode combustor, *Aerospace science and technology*, 2017, vol. 67, pp. 96-104, DOI: 10.1016/j.ast.2017.03.040.
10. Jin Y., Sun S., Tan H. et al. Flow response hysteresis of throat regulation process of a two-dimensional mixed-compression supersonic inlet. *Chinese journal of aeronautics*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 112-127, DOI: 10.1016/j.cja.2021.06.013.
11. Gutov B.I., Zvegintsev V.I., Melnikov A.Yu. Vliyanie protivodavleniya na techenie v diffuzore sverkhzvukovogo vozdukhobornika [The effect of back pressure on the flow in the diffuser of a supersonic air intake]. *Vestnik PNIPU, Aerokosmicheskaya tekhnika [Bulletin of Perm national research polytechnic university, Aerospace engineering]*, 2017, no. 49, pp. 18-28.
12. Wang K., Wang J.Y., Huang H.X. et al. Effects of backpressure on unstart and restart characteristics of a supersonic inlet. *The Aeronautical journal*, 2023, vol. 127, iss. 1316, pp. 1774-1792, DOI: 10.1017/aer.2023.19.
13. Zhao Y.L., Zhou Y.Y., Zhao Y.X. Experimental study of the unstart/restart process of a two-dimensional supersonic inlet induced by backpressure. *Journal of applied fluid mechanics*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 415-426, DOI: 10.47176/jafm.15.02.33220.
14. Cengel Y.A., Boles M.A. *Thermodynamics: an engineering approach* (4th ed.). McGraw-Hill College, 2001, 960 p.
15. Tennekes H., Lumley J.L. *A First course in turbulence* (14th ed.). MIT Press, Cambridge, 1992, 360 p.
16. ANSYS Fluids. Computational fluid dynamics, available at: <https://www.ansys.com/products/fluids> (accessed: 02/18/2024).
17. Barth T.J., Jespersen D.C. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes, *AIAA Paper*, 1989, DOI: 10.2514/6.1989-366.
18. Menter F.R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2009, vol. 23, pp. 305-316, DOI:10.1080/10618560902773387.
19. Menter's Shear stress transport. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Menter%27s_Shear_Stress_Transport (accessed: 02/18/2024).

Kuzmin Alexander Grigorievich. Doctor of physics and mathematics, docent, head researcher, Faculty of mathematics and mechanics, St. Petersburg state university, Scopus AuthorID: 7103224489, ORCID: 0000-0002-1699-9600, a.kuzmin@spbu.ru, 198504, Russia, St. Petersburg.

Статья поступила в редакцию 20.03.2024; одобрена после рецензирования 14.05.2024; принята к публикации 10.04.2025.

The article was submitted 03/20/2024; approved after reviewing 05/14/2024; accepted for publication 04/10/2025.

УДК 519.23:005.334: 004.942

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.005

Модель выработки решений по организации профилактических ремонтов инфокоммуникационной техники на основе принципа единого ресурса

Мальцев Никита Дмитриевич¹, Полетайкин Алексей Николаевич²,
Данилова Любовь Филипповна¹

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Россия, Новосибирск, nikita.maltsevvv@gmail.com

²Кубанский государственный университет,
Россия, Краснодар

Аннотация. В данной статье разрабатывается подход к генерации управленческих решений по организации профилактических ремонтов комплекса технических средств (КТС) инфокоммуникационной техники. Для выработки решений применяется метод имитационного моделирования, что позволяет прогнозировать необходимость проведения профилактических ремонтов и вероятность возникновения нештатных ситуаций функционирования КТС. Рассматриваются основные проблемы, связанные с применением метода имитационного моделирования для выработки решений по организации профилактических ремонтов КТС, а также пути их решения. Особое внимание уделяется обеспечению оптимального режима реагирования на возникающие инциденты и выработки организационных решений по профилактике КТС на основе принципа единого ресурса. Это обеспечивает минимизацию затрат материальных и трудовых ресурсов на выполнение профилактических ремонтов и повышает надежность инфокоммуникационной техники.

Ключевые слова: профилактические ремонты, инфокоммуникационная техника, принцип единого ресурса, имитационное моделирование, надежность комплекса технических средств, оптимизация организационных процессов

Цитирование: Мальцев Н.Д. Модель выработки решений по организации профилактических ремонтов инфокоммуникационной техники на основе принципа единого ресурса / Н.Д. Мальцев, А.Н. Полетайкин, Л.Ф. Данилова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2 (38). – С. 57-73. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.005.

Введение. Современные подходы к управлению техническими системами направлены на обеспечение надежности и долговечности технических средств (ТС). Однако отсутствие четкой модели профилактических ремонтов приводит к снижению эффективности эксплуатации таких систем. К их числу относятся инфокоммуникационные системы, требующие надежной работы оборудования и сетей, минимизации простоев и рисков отказов оборудования. Организация профилактических ремонтов должна учитывать оптимальное использование ресурсов. В исследовании применен метод имитационного моделирования, что позволило прогнозировать необходимость проведения профилактических ремонтов и вероятность возникновения нештатных ситуаций (НШС). Однако применение данного метода связано с рядом проблем, связанных с рационализацией использования ресурсов, как при эксплуатации, так и при проведении профилактических мероприятий.

1. Постановка задачи. Целью данной работы является исследование применения метода имитационного моделирования для планирования профилактических ремонтов, что обеспечит оптимальное использование ресурсов и повышение надежности инфокоммуникационной системы. В качестве инструментального средства имитационного моделирования выбран пакет AnyLogic ([https:// www.anylogic.ru](https://www.anylogic.ru)).

Задачи исследования:

1. Анализ существующих подходов к организации профилактических ремонтов при помощи метода имитационного моделирования, определение их преимуществ и ограничений.

2. Формулировка требований к модели, обеспечивающей прогнозирование необходимости профилактических ремонтных мероприятий.
3. Разработка модели в среде AnyLogic, включающей учет факторов риска, распределение ресурсов и прогнозирование НШС;
4. Тестирование модели и оценка ее практической применимости на примере комплекса инфокоммуникационной техники (ИКТ).

Объект исследования – процессы технического обслуживания и ремонта устройств КТС ИКТ. Предмет исследования – методика организации профилактических ремонтов с использованием метода имитационного моделирования.

2. Анализ существующих подходов. Из-за случайного характера исследуемых процессов расчеты прогнозных данных об отказах ИКТ довольно требовательны в плане учёта множества случайных факторов для прогнозных данных (температура воздуха в помещении, время непрерывной работы и т.д.), чтобы с помощью них получить прогнозы, сопоставимые по качеству (точности) с прогнозами, полученными при помощи метода имитационного моделирования, поэтому все существующие модели основаны на очень строгих допущениях. Состояние многих ИКТ-систем вообще трудно спрогнозировать, поэтому единственным методом, который может быть применен, является имитационное статистическое моделирование [1].

Имитационные подходы полезны в тех случаях, когда аналитические расчеты сложны или нецелесообразны, а эксперименты с реальными объектами затруднены или невозможны из-за затрат, опасности или продолжительности. Более того, моделирование обеспечивает оперативную поддержку принятия решений, хорошо подходит для оценивания стратегии на основе различных сценариев и способствует более глубокому пониманию моделируемой реальности [2]. Существующие решения, описанные далее, демонстрируют широкий спектр подходов и позволяют выбрать наиболее подходящий метод для решения конкретных задач.

Одним из направлений является разработка имитационных моделей для анализа структуры компьютерных сетей. Например, в статье [3] предложена имитационная модель в AnyLogic, оптимизирующая соединение коммутаторов для повышения надежности и производительности сети. Предложено решение, позволяющее моделировать работу сети, включающей несколько коммутаторов, с учетом возможных отказов элементов сети.

Ключевыми особенностями данной работы являются:

- имитирование отказов в сети, что делает модель приближенной к реальным условиям эксплуатации;
- оптимизационный эксперимент, направленный на поиск наиболее эффективной структуры сети.

Работа раскрывает важность применения имитационного моделирования для проектирования и анализа компьютерных сетей. Методология работы, основанная на AnyLogic, демонстрирует высокую адаптивность к изменениям структуры сети, что является важным преимуществом.

В то же время статья оставляет пространство для дальнейших исследований, например, в области расширения модели на более сложные сетевые топологии или интеграции дополнительных факторов, таких, как пропускная способность и задержки передачи данных.

В статье [4] отражена разработка имитационных моделей одноканальной и двухканальной компьютерных сетей в среде AnyLogic. Авторы ставят цель изучить эффективность функционирования сетей и выявить преимущества имитационного моделирования при решении задач оптимизации сложных систем. Одной из ключевых задач исследования стало сравнение производительности вычислительных сетей. Авторы

исследуют, как интенсивность запросов на сервер влияет на эффективность работы одноканальной сети (рис. 1, а), и выявляют её ограничения при увеличении нагрузки.

Результаты анализа показывают, что добавление второго канала (рис. 1, б) позволяет существенно повысить пропускную способность сети, обеспечивая лучшее распределение нагрузки и снижение времени ожидания.

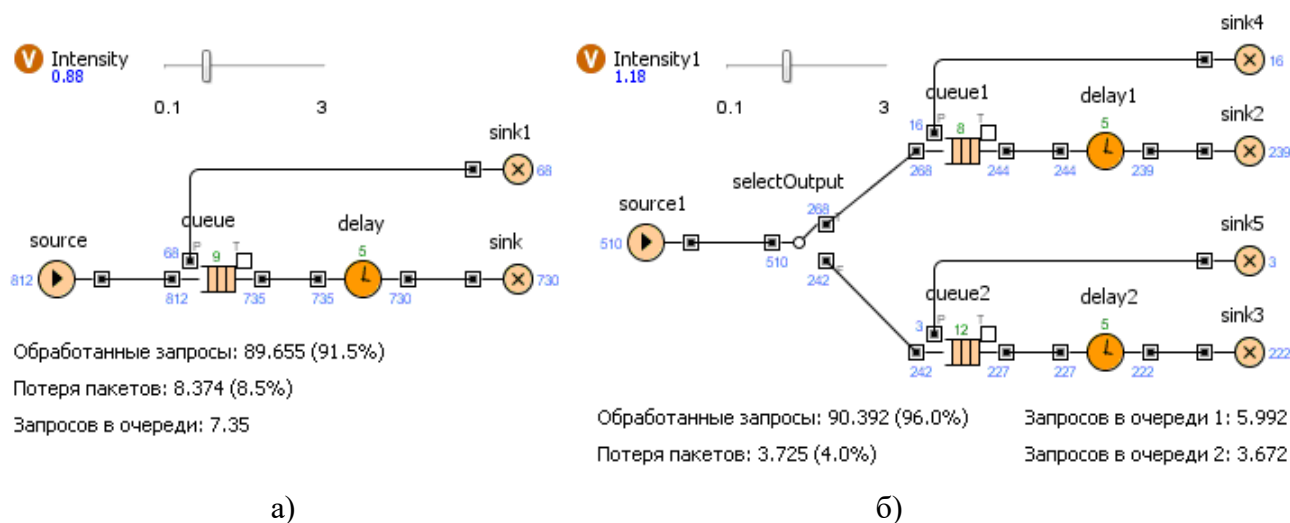


Рис. 1. Одноканальная (а) и двухканальная (б) модель работы сервера [4]

В статье [5] для анализа трафика и потоков используется подход на основе различных законов распределения нагрузочных параметров на характеристики функционирования компьютерной сети. Авторы построили имитационную модель сети в среде AnyLogic для анализа таких параметров, как время ожидания, общее время пребывания заявок и производительность сети. В работе акцент сделан на значения выбора законов распределения времени передачи пакетов, включая экспоненциальное, равномерное, Эрланга и Вейбулла. Результаты моделирования показывают, что законы распределения с коэффициентом вариации, равным или превышающим единицу, существенно влияют на функционирование сети, увеличивая временные задержки и снижая производительность. Исследование подчёркивает значимость использования имитационного моделирования для анализа и оптимизации компьютерных систем. Выводы статьи подтверждают, что выбор закона распределения является ключевым фактором для обеспечения стабильной и эффективной работы сети, что открывает возможности для её дальнейшего проектирования и оптимизации.

Исследование [6] посвящено разработке имитационной модели функционирования сети синхронизации – Synchronization Network (SN), подсистемы телекоммуникационной системы. Основной акцент сделан на моделировании процессов перехода между различными состояниями сети, анализа времени пребывания в каждом состоянии и оценки ключевого показателя – продолжительности цикла управления SN. Этот цикл охватывает период с момента возникновения отказа до восстановления режима передачи синхросигнала. Модель включает 11 состояний сети, разделённых на два класса: состояния, не требующие доступа к системе управления, и состояния, где принятие решений требует значительных ресурсов. Модель учитывает переходы между этими состояниями и ошибки диагностики, которые влияют на процесс восстановления. Модель позволяет оценить влияние характеристик различных подсистем на продолжительность цикла управления и выявить узкие места в процессе восстановления сети. Полученные результаты дают возможность разработать эффективные стратегии управления сетью синхронизации, оптимизировать ресурсы и снизить время простоя сети при сбоях.

Существуют решения, которые уделяют особое внимание вопросам безопасности. Так, в [7] разработан инструмент для исследования воздействия атак на оптические сети связи. Также известен подход к прогнозированию распространения компьютерных вирусов, использующий системно-динамическое моделирование для оценки вероятности эпидемий в компьютерных сетях [8]. Кроме того, разрабатывается многомодельный подход в имитационном моделировании компьютерных сетей (см., например, [9]). Такой подход позволяет использовать различные математические схемы для описания одного объекта, что способствует созданию более точных моделей. Особое внимание уделено сетям Петри, которые применяются для моделирования параллельных и распределённых систем. С помощью сетей Петри можно анализировать структуру и динамическое поведение компьютерных сетей, моделировать потоки информации и процессы, происходящие в системе. Это даёт возможность более детально исследовать структуры и процессы компьютерных сетей. Особое внимание в статье отведено сравнению симуляторов сетей Петри, их функциональности, интерфейса и возможностей. Подчёркивается актуальность многомодельного подхода и его перспективы для исследования компьютерных сетей, а также раскрывает преимущества использования сетей Петри в данном контексте.

Имитационная модель [10] предназначена для анализа и оптимизации процессов обслуживания заявок на ремонт компьютерной техники. Модель построена с использованием среды AnyLogic PLE на основе дискретно-событийного моделирования. Она описывает одноканальную систему массового обслуживания без ограничений, моделирующую процесс обработки заявок с момента их поступления от клиентов до завершения ремонта. Цель модели: проведение вычислительных экспериментов для мониторинга эффективности работы системы обслуживания, прогнозирования эффективности и выявления узких мест в процессах. За основу взят сервер, куда заносятся заявки от клиентов, и диспетчер их обрабатывает. Заявки уходят в очередь заявок на мастеров, либо в отказ. Модель позволяет детализировать каждый этап процесса, изменять параметры очереди, нагрузки и распределение ресурсов сети, времени обработки и вероятностей отклонения заявок, отслеживать ключевые метрики системы (время ожидания, количество обработанных заявок и др.). Недостатками модели являются ограничение масштабируемости, обусловленное использованием бесплатной версии AnyLogic, сложность учёта нестандартных сценариев и ориентированность модели на процессы ремонта компьютерной техники, что требует значительных изменений для адаптации к другим процессам.

Сравнительный анализ рассмотренных подходов и моделей показал (таблица 1), что каждая из моделей имеет сильные стороны, однако ни одна не даёт универсального решения для всех аспектов исследования и оптимизации компьютерных сетей. Они зачастую ограничены спецификой применяемого метода, не учитывают некоторые факторы или требуют значительных усилий для адаптации к конкретным условиям.

Таблица 1. Сравнительная характеристика описанных моделей

Ссылка Показатель	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
Назначение	Оптимизация сети	Анализ эффективности сети	Анализ нагрузок на сеть	Анализ атак на сеть	Интеграция моделей	Анализ атак на сеть	Прогноз вирусных эпидемий в сетях	Оптимизация процессов обслуживания заявок
Гибкость	Низкая	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
Защищённость	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая	Средняя	Высокая	Средняя	Низкая
Открытость	Закрытая	Закрытая	Закрытая	Открытая	Открытая	Открытая	Открытая	Открытая

Это подчеркивает необходимость дальнейшего развития инструментов моделирования, интеграции различных подходов и создания гибких, адаптивных систем, способных более полно охватывать сложность современных компьютерных сетей.

3. Модель организации профилактических ремонтов КТС ИКТ. Ограничения подходов, рассмотренных выше в разделе 2, подтверждают необходимость разработки собственной модели, которая будет учитывать все специфические особенности эксплуатации ИКТ и обеспечит гибкость в анализе различных сценариев.

Для обеспечения эффективности работы КТС и эффективности его технического обслуживания и ремонта необходимо, чтобы ресурс каждого ТС был привязан к ресурсу КТС – был равным ресурсу КТС или был кратным ему, что составляет *принцип единого ресурса*. Отражение в системе существенных свойств ее компонентов, как показано в [11], достигается тогда, когда в содержании (видовом отличии) отражаются функциональные свойства системы в надсистеме, а в объеме компонента отражены внутренние поддерживающие свойства системы, обеспечивающие наличие функциональных свойств, что и составляет указанный выше принцип. В данном случае ресурс ТС есть наработка на отказ, которая измеряется в сутках и определяет промежуток времени, в течение которого данное ТС гарантировано работоспособно. Кратность ресурса ТС – отношение его ресурса r к ресурсу КТС R .

Исходные данные:

- детальная структура КТС и его ресурс R ;
- эксплуатационные показатели ТС;
- характеристики ТС, от которых зависит надежность (условия эксплуатации).

Результаты моделирования:

- 1) точечные оценки показателей надёжности КТС ИКТ;
- 2) вероятности возникновения НШС в заданном интервале времени, а также их возможные последствия для КТС;
- 3) коэффициент технического использования КТС с учетом его восстановления после отказов;
- 4) график плановых (профилактических) ремонтов КТС, построенный в соответствии с принципом единого ресурса.

Результат 4 предполагает группировку устройств КТС по величине требуемого ресурса и их кратности ресурсу КТС. Данная группировка выполнена методом аналогии с группировкой деталей судовых дизелей в соответствии с исследованием [12]:

Группа I – Критическое ТС, ремонт и/или замена которого возможны только при проведении планового ремонта, в условиях сервисного центра и требуют остановки КТС на период ремонта. Ресурс такого устройства не ниже R . Например, серверы, коммутаторы, магистральные сетевые устройства.

Группа II – Важное ТС, ремонт и/или замену которого целесообразно осуществлять при проведении плановых ремонтов или в условиях функционирования КТС с ощутимым понижением эффективности КТС. Ресурс такого устройства не ниже R/n_r , где n_r – заданное число плановых ремонтов. Например, рабочие станции пользователей и их комплектующие (платы оперативной памяти, жесткие диски и др.), консольные устройства, роутеры и др.

Группа III – Второстепенное ТС, ремонт и/или замену которого возможно оперативно выполнить в условиях функционирования КТС без существенного ущерба для КТС. Ресурс такого устройства не ниже $R/(n_r n_{mr})$, где n_{mr} – заданное максимально допустимое число межремонтных остановок КТС. Например, принтеры, сканеры, мультимедийные устройства и др.

В общем виде математическая модель, выражающая степень достижения единого ресурса КТС, имеет вид:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{3R} \left[\frac{1}{N^I} \sum_{i=1}^{N^I} r_i^I + \frac{n_r}{N^{II}} \sum_{j=1}^{N^{II}} r_j^{II} + \frac{n_r n_{mr}}{N^{III}} \sum_{l=1}^{N^{III}} r_l^{III} \right], \\ F_2 = \frac{1}{N^I} \sum_{i=1}^{N^I} \left[\frac{1}{r_i^I N_i^I} \sum_{j=1}^{N_i^I} r_{ij} \right]. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь R , n_r , n_{mr} – задаваемые параметры модели (см. выше); N^I , N^{II} , N^{III} – число ТС соответственно I, II, III группы; N_i^I – число элементов i -го ТС I группы; r_i^I – ресурс i -го ТС I группы, ч.; r_j^{II} – ресурс j -го ТС II группы, ч.; r_l^{III} – ресурс l -го ТС III группы, ч.; r_{ij} – ресурс j -го функционального элемента i -го ТС I группы.

Величина F_1 представляет собой степень достижения единого ресурса КТС, состоящего из узлов и устройств, а величина F_2 – степень достижения единого ресурса критическими ТС I группы на уровне их функциональных элементов. Для этих величин верным будет следующее выражение:

$$F_1 \geq 1 \text{ и/или } F_2 \geq 1.$$

В выражении (1) присутствуют 4 переменные (r_i^I , r_j^{II} , r_l^{III} , r_{ij}), на которые оказывают влияние ремонтно-профилактические мероприятия технического обслуживания. Очевидно, что, чем выше величина F , тем больший ресурс реализован, что, безусловно, увеличивает надежность устройств и КТС в целом. Однако это достигается за счет увеличения затрат, т.е. может привести к неоправданному завышению стоимости КТС и его эксплуатации. Поэтому величины F_1 и F_2 целесообразно устремить к единице.

Реализация модели выполнена на языке программирования Java с использованием пакета имитационного моделирования AnyLogic для анализа отказов компонентов и вычисления статистических оценок надежности КТС в двух функциональных аспектах:

- 1) как есть – моделирование функционирования КТС с реальными значениями параметров;
- 2) как должно быть – моделирование функционирования КТС в полном соответствии с принципом единого ресурса.

Модель интегрирует функциональные возможности AnyLogic для работы с компонентами, сетями, а также для графического представления данных. Используются классы и библиотеки Java для управления данными и объектами, такие, как ArrayList, HashMap, TreeSet и Comparator для упрощения хранения и сортировки данных, а также Calendar, Date и Timer для отслеживания временных параметров. Для хранения результатов и подключения к базам данных применяются классы Connection, ResultSet и Statement из пакета java.sql. Визуализация динамики отказов и статистических характеристик выполняется с использованием инструментов ядра Anylogic 8.9.1 и встроенных компонентов AnyLogic, таких, как DensityMap, PedFlowStatistics, а также классов для графического представления элементов (Network, Position) [13].

Для моделирования системы был выбран агентный подход, потому что он позволяет учитывать индивидуальные особенности поведения каждого элемента системы, при этом обрабатывая ключевые события внутри системы в каждый момент времени, являющийся дискретным. Это позволяет исследовать поведение системы на основе действий отдельных ее частей. При этом агентное моделирование комбинировалось с дискретно-событийным подходом для обеспечения простоты схемы перемещения персонала [14].

В модели существуют несколько типов агентов: роутер (Router), коммутатор (Switch), сервер (Server), рабочее место (Workplace), технический инженер (SystemEngineer), и Main – агент верхнего уровня. Агент SystemEngineer выполняет функции по восстановлению, контролю и профилактике ТС (экземпляры агентов Router, Switch, Server, Workplace), за работоспособность которых он ответственен, в порядке очереди.

Апостериори для моделирования временных параметров модели взяты нормально распределенные случайные величины со следующими параметрами распределения: время ремонта – $E = 1$, $\sigma = 1/2$; время контрольных мероприятий – $E = 1/12$, $\sigma = 1/48$; время профилактических мероприятий – $E = 1/4$, $\sigma = 1/24$ при единице модельного времени – сутки.

Каждый агент имеет свои атрибуты (поля), функции (методы) для работы с ними и диаграмму состояний. К примеру, описание состояний агента «Router» представлено на рис. 2.

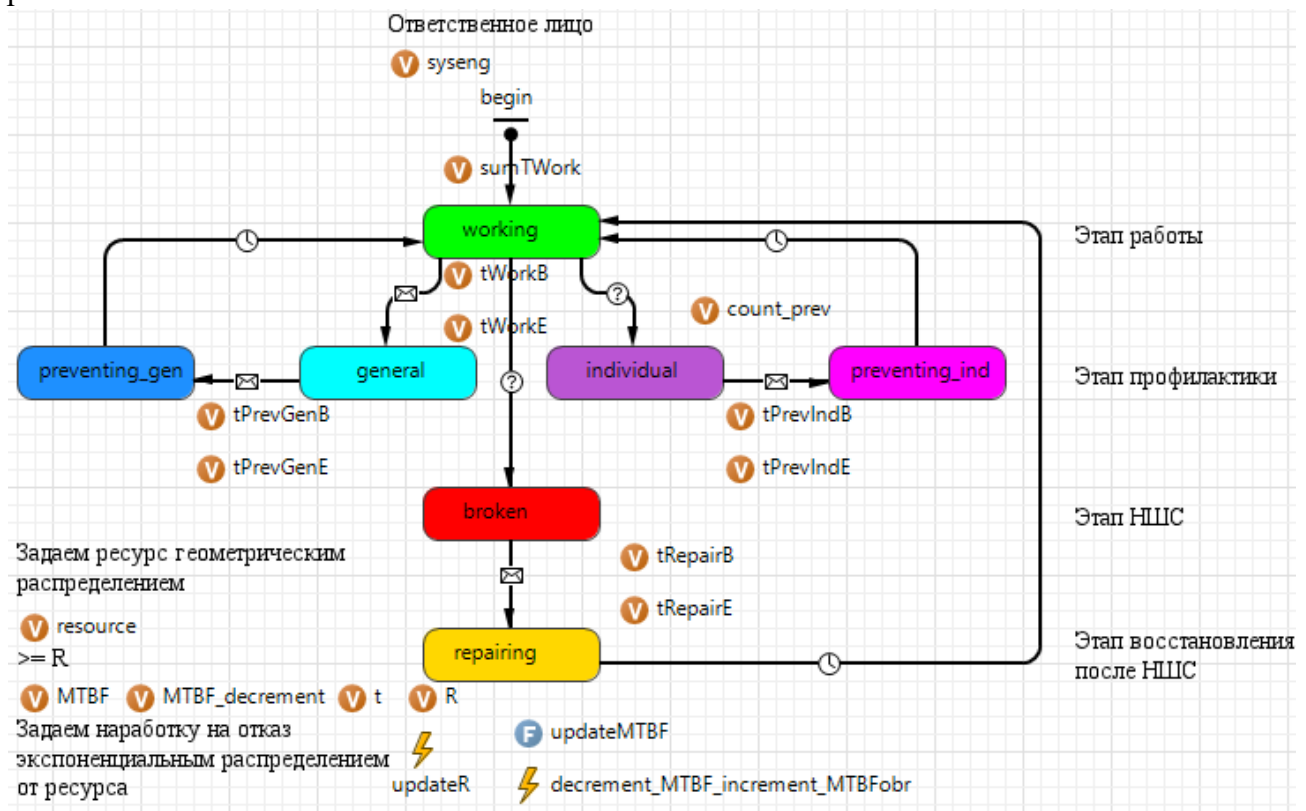


Рис. 2. Диаграмма состояний агента «Router»

Агент «Router» может принимать следующие состояния в зависимости от его ресурса и ресурса всего КТС:

- работоспособное (working) – начальное состояние для ТС, в котором оно стабильно функционирует;
- ожидает контрольное (индивидуальное) мероприятие для предупреждения НШС (individual) – состояние ТС, в которое оно переходит вследствие достижения критического уровня надежности (R) техническим средством;
- в процессе контрольной (индивидуальной) профилактики (preventing_ind) – состояние, в которое переходит ТС после начала работ по индивидуальной профилактике.
- ожидает плановое мероприятие для предупреждения НШС по всему КТС (individual) – состояние ТС, в которое оно переходит вследствие достижения критического уровня надежности (R) всем КТС;
- в процессе плановой профилактики (preventing_gen) – состояние, в которое переходит ТС после начала работ по плановой профилактике;

- неработоспособное (broken) – состояние, в которое переходит ТС в результате возникновения НШС;
- в процессе восстановления (repairing) – состояние, в которое переходит ТС из состояния broken после начала работ по восстановлению его работоспособного состояния.

Ответственное лицо за функционирование КТС обязано соблюдать оптимальный режим реагирования на возникающие инциденты. Возникающие события имеют иерархическую структуру. Наиболее важными событиями являются непосредственно НШС – выходы из строя ТС. Реагирование на данный тип события происходит незамедлительно после завершения работы над текущей операцией. После устранения всех НШС ответственное лицо приступает к проведению профилактических мероприятий, причем в процессе ожидания контрольной профилактики ТС может перейти в состояние ожидания планового ремонта, что подчеркивает более высокий приоритет данного типа профилактики.

По окончании профилактики ресурс увеличивается на долю от изначального времени функционирования ТС (в модели взяты доли 0,1 и 0,3 соответственно для индивидуального и планового профилактического мероприятия).

На данный момент существенных отличий в цикле «working-broken-repairing-working» между агентами нет. Агенты имеют различия в наборе полей (атрибутов). Агент «Switch» помимо вышеперечисленных атрибутов включает в себя поле, идентифицирующее роутер, к которому он подключен. Агент «Server» помимо вышеперечисленных атрибутов включает в себя поле, идентифицирующее коммутатор, к которому он подключен. Агент «Workplace» помимо вышеперечисленных атрибутов включает в себя поле, идентифицирующее сервер, от которого АРМ получает данные для корректного функционирования.

Модель начинает свою работу с создания популяций агентов (рис. 3, а) и инициализации входных параметров (рис. 3, б), которые задают количество ТС (объем популяций), ресурс КТС R , количество профилактических мероприятий и дополнительные параметры (время, по истечении которого ТС не считается браком, критические уровни надежности ТС и КТС). Затем вызывается функция «Initialization», которая размещает экземпляры данных популяций в пространстве и присваивает начальные значения атрибутам (полям) данных агентов (рис. 3, в).

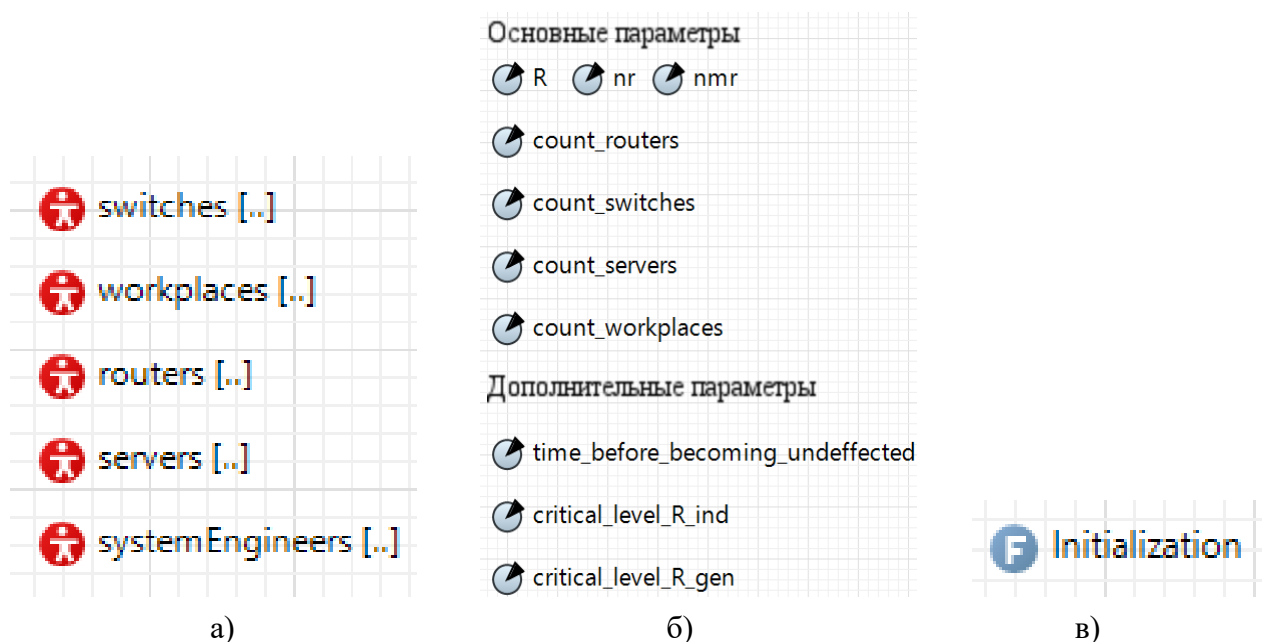


Рис. 3. Параметры имитационной модели: а) популяции агентов в модели, б) входные параметры модели (input), в) функция «Initialization»

Обозначим количество роутеров за Cr . Поведение данной функции можно разделить на 3 случая: $Cr > 1$, $Cr = 1$, $Cr = 0$. При каждом случае выстраивается соответствующая структура КТС в пространстве для обеспечения наглядности связей между агентами (рис. 4).

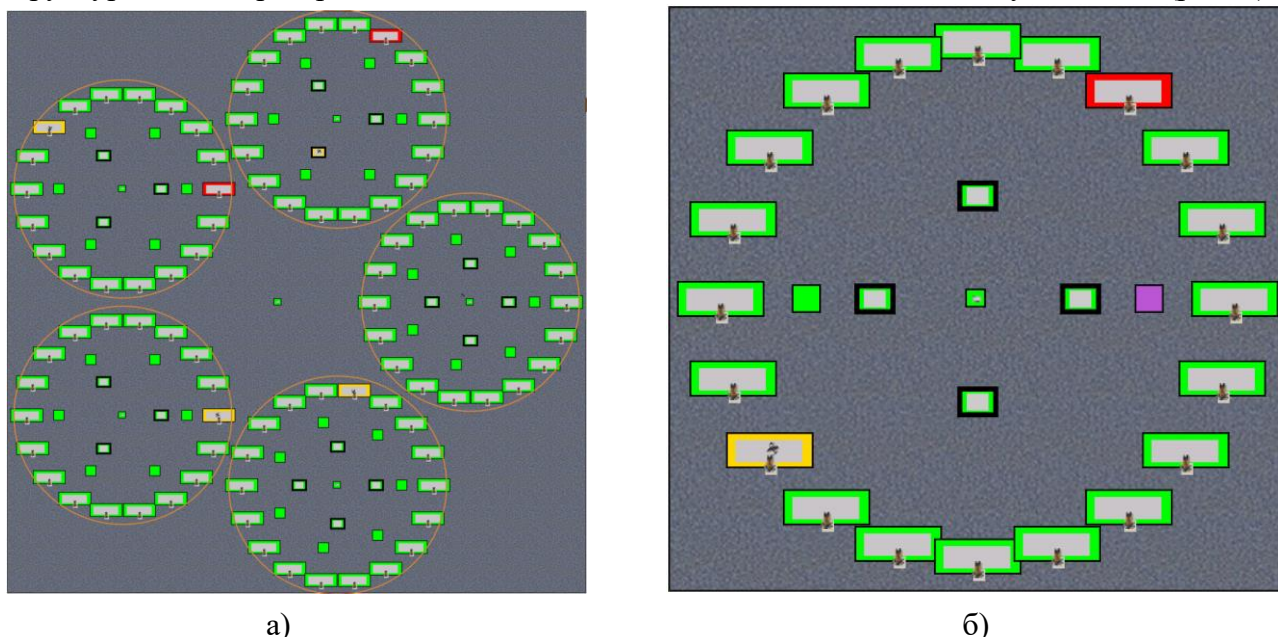


Рис. 4. Случаи распределения ТС в пространстве модели AnyLogic:
а) первый случай ($Cr = 6$), б) второй случай ($Cr = 1$)

Разработанная структура определяет масштаб сети – каждый роутер задает отдельный узел сети, который, как правило, находится на достаточно большом расстоянии от других узлов сети, и необходимо, как минимум, одно ответственное лицо, которое будет поддерживать стабильную работу узла. Предполагается, что для связи между узлами используется центральный узел, осуществляющий доставку пакетов данных между узлами для поддержания топологии сети «звезда». При этом надежность крупномасштабных сетей должна снижаться заметно стремительнее, чем отдельных узлов, так как она их агрегирует, а надежность в процессе функционирования КТС может только убывать.

После вызова функции инициализации начинается процесс функционирования КТС – технические средства циклично переходят из работоспособного состояния в неработоспособное. Время функционирования и время восстановления, количество работоспособных элементов и элементов, вышедших из строя в результате НШС, фиксируется в переменных агента верхнего уровня Main (рис. 5). Время функционирования ТС формируется из базового ресурса (часть от ресурса КТС R) с коррекцией по геометрически распределенной случайной величине с параметром $p = 0,8$ (предполагается, что лишь 20% ТС перерабатывают свой базовый ресурс). Само время функционирования ТС подчиняется экспоненциальному распределению с соответствующим параметром λ для данного типа агента.

На основании данных из этих переменных формируются агрегированные по всем типам ТС выходные данные модели (output) в соответствии с требованиями к результатам моделирования, примеры которых приведены на рис. 6–8 при входных параметрах модели: count_routers = 6 шт., count_switches = 16 шт., count_servers = 50 шт., count_workplaces = 100 шт., $R = 10000$ дней. Следует отметить возможность анализа выходных данных отдельно по каждому ТС, что лучше поддается анализу и интерпретации.

Обозначим за t время эксплуатации системы, измеряемое в сутках, в течение которого оцениваются параметры надежности и эксплуатационные характеристики КТС, тогда с учетом обозначений получим следующие оценки надежности системы.

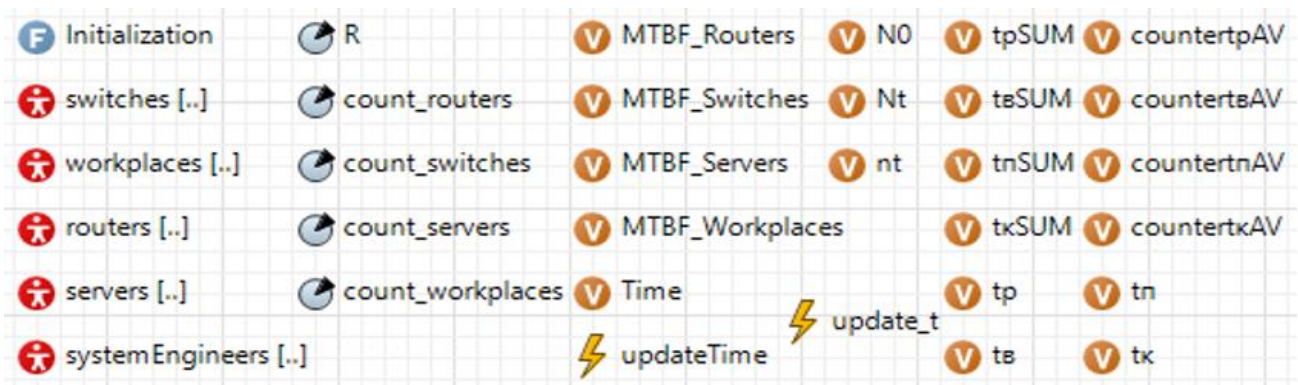


Рис. 5. Переменные агента верхнего уровня Main

Для экспоненциального распределения отказов точечная оценка средней наработки на отказ с учётом восстановления:

$$\tilde{\tau} = \frac{S}{n_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где S – суммарная наработка всех систем за время испытаний (суток); n_{Σ} – суммарное число отказов всех систем за время испытаний (штук).

Оценка интенсивности отказов $\tilde{\lambda}$ при экспоненциальном распределении может быть определена через оценку средней наработки на отказ как обратная её величина. При этом на достаточно большом интервале продолжительности испытаний $\hat{T}$ оценка параметра $\tilde{\omega}$ простейшего потока совпадает с оценкой интенсивности отказов $\tilde{\lambda}$:

$$\tilde{\omega} = \tilde{\lambda} = \frac{1}{\tilde{\tau}}. \quad (3)$$

Графики зависимостей значений величин $\tilde{\tau}$ и $\tilde{\omega}$ от параметров реализации модели показаны на рис. 6.

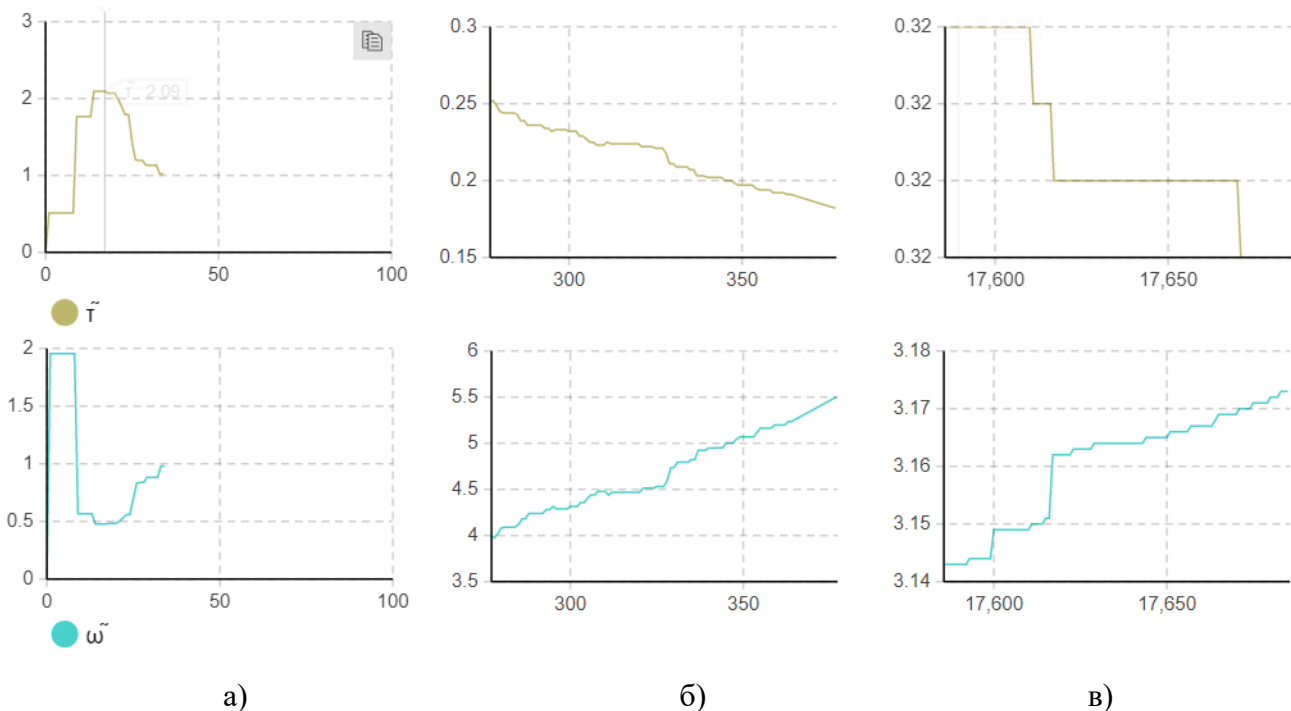


Рис. 6. Значения выходных параметров $\tilde{\tau}$ (дней) и $\tilde{\omega}$ (дней⁻¹):

а) при $t < 30$ (месяц), б) при $t > 365$ (~год), в) при $t \rightarrow \infty$

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в заданном интервале времени t не возникает отказ ТС. Эта характеристика связана с функцией распределения времени безотказной работы следующим соотношением:

$$P(t) = 1 - Q(t),$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы, $Q(t)$ – функция распределения времени безотказной работы, выражающая вероятность появления отказа в течение времени t .

Очевидно, что $0 \leq P(t) \leq 1$, $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$. Следует также отметить, что функция $P(t)$ является монотонно убывающей, так как надёжность в процессе эксплуатации может только убывать.

Для определения статистической величины $P(t)$ используется следующая оценка:

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (4)$$

где N_0 – число элементов, поставленных на эксплуатацию (штук); $n(t)$ – число элементов, отказавших в течение времени t (штук).

Коэффициент готовности K_G – вероятность того, что в течение времени t аппаратура КТС работоспособна.

Для определения величины K_G используется следующая статистическая оценка:

$$K_G^*(t) = \frac{N_t}{N_0}, \quad (5)$$

где N_0 – общее число элементов (штук), N_t – число элементов, находящихся в работоспособном состоянии в течение времени t (штук). При этом надёжность P – это монотонно убывающая величина, зависящая от количества отказов (в период приработки она стремительно уменьшается), а коэффициент готовности характеризует долю работоспособных ТС от общего количества ТС в данный конкретный момент.

Коэффициент технического использования – относительная доля времени в цикле $T_{ц}$, когда аппаратура выполняет заданные функции. Полное время $T_{ц}$ может быть разделено на следующие составляющие: t_p – время работы, затрачиваемое на выполнение заданных функций (суток); t_e – время, затрачиваемое на восстановления после появления отказов (суток); t_n – время, затрачиваемое на проведение профилактических мероприятий (суток); t_k – время, затрачиваемое на проведение контроля работоспособности оборудования (суток). Для определения этого коэффициента используется следующая статистическая оценка:

$$K_{И}^* = \frac{t_p}{t_p + t_e + t_n + t_k}. \quad (6)$$

Графики зависимостей значений коэффициентов P^* , K_G , $K_{И}^*$ от времени функционирования КТС показаны на рис. 7, а значений временных параметров t_p , t_e , t_k и t_n – на рис. 8 (до окончания периода приработки параметры t_k и t_n сохраняют нулевое значение).

4. Принятие управленческих решений. Практическое применение модели для организации профилактических ремонтов ИКТ рассмотрим на конкретном примере. Возьмем результаты запуска имитационного эксперимента из предыдущего раздела. Показатель $\tilde{\tau}$ (2) в начале эксперимента стремительно возрастает, затем монотонно убывает. Это является следствием периода приработки, в течение которого выходят из строя ТС, к которым не применяются профилактические мероприятия.

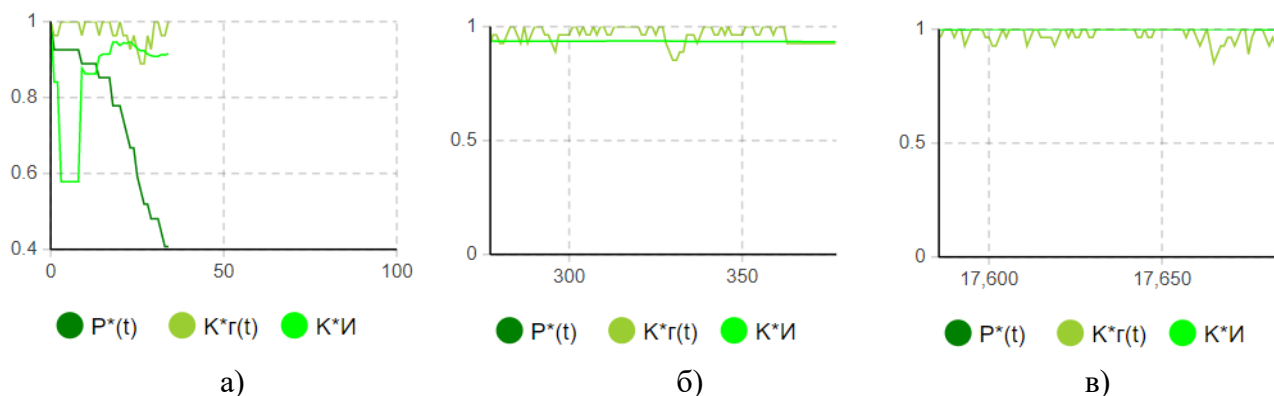


Рис. 7. Значения выходных параметров $P^*(t)$, $K_r^*(t)$ и K_{II}^* :

а) при $t < 30$ (месяц), б) при $t > 365$ (~год), в) при $t \rightarrow \infty$

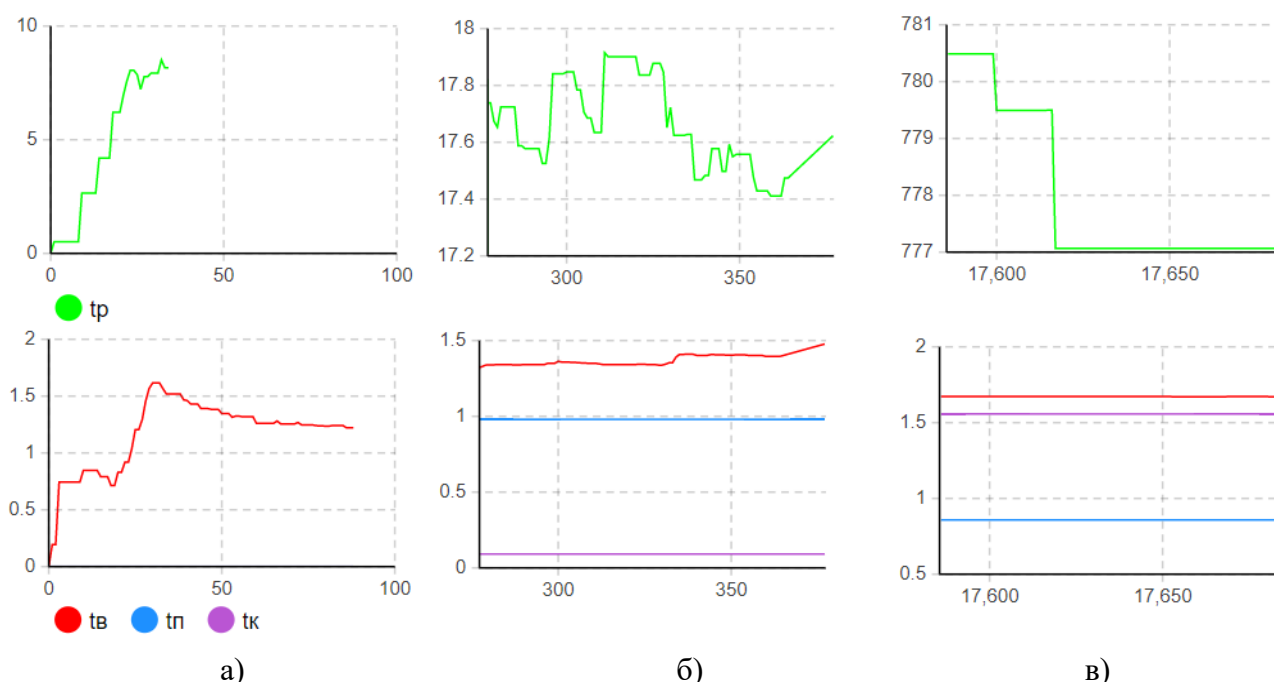


Рис. 8. Значения временных параметров t_p , t_e , t_k и t_n

а) при $t < 30$ (месяц), б) при $t > 365$ (~год), в) при $t \rightarrow \infty$

Порог брака задается во входных параметрах модели (см. рис. 3, б). Данный показатель определяет минимальный промежуток времени, в течении которого ТС должно оставаться работоспособным после ввода в эксплуатацию. В случае недостижения минимальной наработки на отказ ТС признается бракованным, и к нему не применяются профилактические мероприятия.

Показатель (2) возрастает при увеличении количества профилактических мероприятий, но за этим могут следовать дополнительные издержки. В частности, можно наблюдать эффект от проведения профилактических мероприятий, сравнивая данный коэффициент после периода приработки ($t > 365$ и $t \rightarrow \infty$).

Показатель (3) $\tilde{\omega} \approx 0$ в период приработки стремительно возрастает с последующей коррекцией. После коррекции возникает возрастающий тренд, направление которого периодически меняется при проведении профилактических мероприятий. В частности, можно наблюдать эффект от проведения профилактических мероприятий, сравнивая данный коэффициент после периода приработки ($t > 365$ и $t \rightarrow \infty$).

Коэффициент $P^*(t)$ (4) показывает надежность КТС в целом. Он игнорирует продолжительность работы и восстановления оборудования и ссылается лишь на отказы оборудования за промежуток времени t . Очевидно, что он может только убывать, в пределе достигая значения нуля. В период приработки существенно снижается, по истечению периода приработки фиксируется на определенном уровне с убывающим трендом. Коэффициент готовности $K_g^*(t)$ (5) позволяет отслеживать моменты времени, в которые КТС наиболее подвержен отказам. Скачки данного показателя сигнализируют об отказе части системы в конкретные промежутки времени. Коэффициент технического использования K_{IT}^* (6) указывает на то, что ресурс R и кратные ему ресурсы r значительно превосходят время нахождения в иных состояниях, которое можно оценить по последним показателям t_e, t_n, t_k . Также стоит различать показатели t_p и $\tilde{t}$. Первый не учитывает отказы оборудования, а лишь показывает среднее время нахождения в работоспособном состоянии, в то время, как второй считает именно средний промежуток времени между отказами.

Таким образом, можно констатировать, что в системе профилактические мероприятия оказывают большое влияние на работу КТС. Эффект от проведения профилактических мероприятий подтверждает положительное влияние на систему в целом в виде предупреждения НШС. Целесообразность введения профилактических мероприятий для повышения надежности КТС обоснована, и теперь стоит задача оптимизации количества таковых мероприятий, потому как они сопровождаются дополнительными издержками.

Поскольку рассмотрение стоимости проведения профилактических мероприятий на данном уровне абстракции не предусмотрено, необходимо найти минимальное количество мероприятий, при котором достигается максимальный эффект, учитывая, что наработка на отказ не должна превосходить базовый ресурс, так как в этом случае нарушается принцип единого ресурса.

Система предусматривает нахождение оптимального количества мероприятий путем оптимизационного эксперимента. Поскольку в AnyLogic нельзя устремить целевую функцию к константе (в выражении (1) $F_1 \rightarrow 1$), но можно максимизировать либо минимизировать, то путем несложных преобразований получаем следующую целевую функцию из критерия F_1 :

$$\left[\frac{1}{N^I} \sum_{i=1}^{N^I} r_i^I + \frac{n_r}{N^{II}} \sum_{j=1}^{N^{II}} r_j^{II} + \frac{n_r n_{mr}}{N^{III}} \sum_{l=1}^{N^{III}} r_l^{III} \right] - 3R \rightarrow \min$$

Также, необходимо ввести систему ограничений. Для этого приравняем критерий F_2 единице (данное значение соответствует принципу единого ресурса):

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{r_i N_i} \sum_{j=1}^{N_i} r_{ij} \right] = 1.$$

Результаты оптимизационного эксперимента и его входные параметры представлены на рис. 9, горизонт планирования – 10 лет. Здесь по оси ординат отложено значение приведенной целевой функции, по оси абсцисс – итерации оптимизационного алгоритма.

По результатам оптимизационного эксперимента видно, что достаточно трех плановых ремонтов с полной остановкой КТС в год при условии, что между ними будет проведено 10 межремонтных остановок ТС в целях профилактики.

На результаты данного эксперимента ЛПР может ссылаться при принятии решения о количестве профилактических мероприятий в течение времени t , обосновывая свое решение тем, что при данном количестве профилактических мероприятий в отношении КТС

достигается единый ресурс R . Также можно сделать вывод о том, что техника КТС в целом надежная, но она не может работать непрерывно в течение длительного промежутка времени.

model_nil : Optimization

	Текущее	Лучшее
Итерация:	74	29
Функционал:	-243.305	-7,518.178
Параметры	Copy best	
count_routers	6	6
count_switches	17	17
count_servers	32	32
count_workplaces	90	90
nr	27	24
nmr	94	100
R	1,000	1,000
time_before_becoming_undefined	180	180
critical_level_R_ind	0.2	0.2
critical_level_R_gen	0.5	0.5

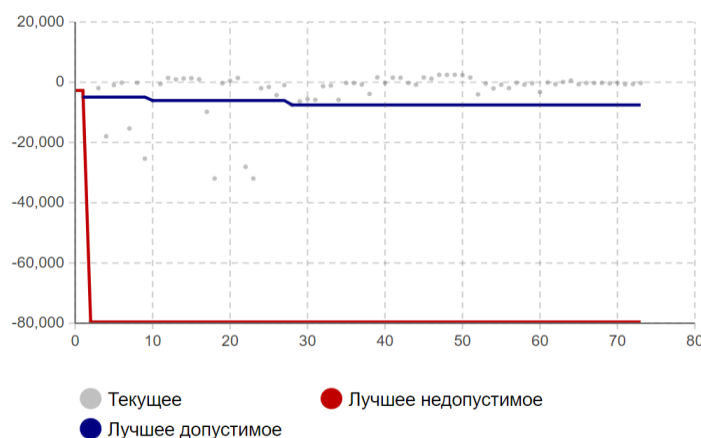


Рис. 9. Результаты оптимизационного эксперимента

Заключение. Разработанная модель выработки решений по организации профилактических ремонтов технических средств ИКТ направлена на повышение устойчивости цифровой среды организации. Применение метода агентного моделирования позволило учесть децентрализованную структуру системы и гибко анализировать различные сценарии эксплуатации. Выбор метода имитационного статистического моделирования и его реализация в среде AnyLogic показали свою эффективность для решения поставленных задач, однако выявили необходимость дальнейшей калибровки и настройки модели для повышения точности прогнозирования.

Анализ существующих моделей показал, что предложенные решения не вполне удовлетворяют специфическим требованиям задачи из-за ограничений в учете всех факторов, влияющих на процессы профилактических ремонтов. В связи с этим была обоснована необходимость разработки новой модели, которая позволяет более точно моделировать различные аспекты работы инфокоммуникационных систем и эффективно прогнозировать потребность в профилактических ремонтах с учетом принципа единого ресурса. Результаты исследования подтверждают целесообразность использования предложенной модели для оптимизации процессов эксплуатации инфокоммуникационной техники, что в дальнейшем может способствовать повышению ее надежности и снижению затрат на обслуживание.

Также дальнейшие исследования будут направлены на развитие модели посредством добавления показателей надежности устройств ИКТ и обеспечения информационно-технической устойчивости комплекса ИКТ, находящегося под разноректорным внешним информационным воздействием [15]. Также планируется реализация оптимизационной модели для составления графика профилактических мероприятий.

Список источников

1. Qodirov A., Ganiyev A., Sherjanova K. Modeling the intermediate node of network based on M/M/2/1 system model in Anylogic program. Communications, 2019, no. 7(1), pp. 25-30, DOI: 10.11648/j.com.20190701.14.
2. Kogler C., Rauch P. Game-based workshops for the wood supply chain to facilitate knowledge transfer. International journal of simulation modelling, 2020, vol. 19(3), pp. 446-457, DOI: 10.2507/IJSIMM19-3-526.

3. Попов А.А. Оптимизация структуры компьютерной сети средствами имитационного моделирования в среде AnyLogic / А.А. Попов, М.М. Яблокова // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации, 2016. – № 6-2. – С. 181-190. – EDN WMFUSR.
4. Обухов П.А. Разработка имитационных моделей в среде AnyLogic для исследования эффективности работы компьютерных сетей / П. А. Обухов, А. Б. Николаев // Автоматизация и управление в технических системах, 2014. – № 4(12). – С. 71-81. – DOI: 10.12731/2306-1561-2014-4-8. – EDN TGMHBT.
5. Фарашиани М.А. Оценка влияния законов распределения параметров нагрузки на качество функционирования компьютерной сети / М.А. Фарашиани, Л.А. Муравьева-Витковская // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО: в 5 т., Санкт-Петербург, 02–06 февраля 2016 года. Том 5. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016. – С. 135-137. – EDN ZOPGUJ.
6. Kanaev A.K., Oparin E.V, Oparina E.V. Model of the synchronization network functioning process in the context of intellectualization of network control functions. E3S Web Conf., 2020, vol. 224, 01028, DOI: 10.1051/e3sconf/202022401028.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667024 РФ. Имитационная модель процесса функционирования транспортной сети связи в условиях реализации компьютерных атак: № 2019666102: заявл. 09.12.2019; опубл. 18.12.2019 / А. Н. Иванин. – EDN RIMDJQ.
8. Шална Н. А. Исследование возможности применения метода системно-динамического моделирования для прогнозирования вирусных эпидемий в компьютерных сетях / Н.А. Шална, А.А. Сторожева // Молодежный научно-технический вестник, 2017. – № 5. – С. 45. – EDN ZRNHIT.
9. Семеновых А.А. Многомодельный подход к моделированию компьютерных сетей / А.А. Семеновых // Вестник молодых ученых ПГНИУ: сборник научных трудов / отв. редактор В.А. Бячкова; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2015. – Т. 5. – С. 144-151. – EDN WAUDYF.
10. Веремчук Н.С. О разработке имитационной модели по ремонту компьютерной техники / Н.С. Веремчук // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: Сборник материалов V Национальной научно-практической конференции, Омск, 28 апреля – 29 2022 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. – С. 551-556. – EDN RIXEPD.
11. Маторин С.И. Детерминантная модель системы и системологический анализ принципов детерминизма и бесконечности мира / С.И. Маторин, Е.А. Соловьева // НТИ, 1996. – Сер. 2. – № 8. – С. 1-8.
12. Костенко А.В. Принцип единого ресурса при проектировании и производстве деталей судовых дизелей / А.В. Костенко, А.Н. Полетайкин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения, 2018. – № 4(63). – С. 43-48. – EDN XUXMKT.
13. Java в AnyLogic: общие сведения об использовании Java в Anylogic. – URL: <https://anylogic.help/ru/advanced/code/general.html> (Дата обращения: 25.02.25).
14. Россихин Л.В. Агентное моделирование задачи распределения ресурса / Л.В. Россихина // Информационные технологии в УИС, 2024. – № 3. – С. 21-29. – EDN ZLLDVL.
15. Карпович А.И. Определение категории устойчивости в сложных социотехнических системах / А.И. Карпович, А.В. Никифорова, А.Н. Полетайкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки, 2017. – № 1. – С. 147-163. – EDN YKJVBj.

Мальцев Никита Дмитриевич. Студент 4 курса кафедры математического моделирования и цифрового развития бизнес-систем, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики. AuthorID: 1288964, SPIN: 9795-2490, nikita.maltsevv@gmail.com, 630009, Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.

Полетайкин Алексей Николаевич. Кандидат технических наук, кафедра информационных технологий, Кубанский государственный университет. AuthorID: 768719, SPIN: 1142-5984, Scopus AuthorID: 57213829361, ORCID: 0000-0002-5128-1952, alex.poletaykin@gmail.com, 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

Данилова Любовь Филипповна. Кандидат технических наук, кафедра математического моделирования и цифрового развития бизнес-систем, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики. AuthorID: 992817, SPIN: 8125-9603, Scopus AuthorID: 57215304358, ORCID: 0000-0003-0907-0200, LubErmolenko@yandex.ru, 630009, Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.

UDC 519.23:005.334: 004.942

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.005

A Decision-making model for organizing preventive maintenance of infocommunication equipment based on the unified resource principle

Nikita D. Maltsev¹, Alexei N. Poletaikin², Lyubov F. Danilova¹

¹Siberian state university of telecommunications and information science,
Russia, Novosibirsk, nikita.maltsevvv@gmail.com

²Kuban state university,
Russia, Krasnodar

Abstract. This article develops an approach to generating managerial decisions for organizing preventive maintenance of a complex of technical means (CTM) of infocommunication equipment. The decision-making process utilizes the simulation modeling method, enabling the prediction of the need for preventive maintenance and the likelihood of emergencies in CTM operation. The article addresses key challenges associated with the use of simulation modeling for organizing CTM preventive maintenance and proposes solutions to these issues. Particular attention is given to ensuring an optimal response mode to emerging incidents and generating organizational decisions for CTM maintenance based on the unified resource principle. This approach minimizes material and labor costs for conducting preventive maintenance and improves the reliability of ICT.

Keywords: preventive maintenance, infocommunication equipment, unified resource principle, simulation modeling, technical means reliability, optimization of organizational processes

References

1. Qodirov A., Ganiyev A., Sherjanova K. Modeling the intermediate node of network based on M/M/2/1 system model in Anylogic program. Communications, 2019, no. 7(1), pp. 25-30, DOI: 10.11648/j.com.20190701.14.
2. Kogler C., Rauch P. Game-based workshops for the wood supply chain to facilitate knowledge transfer. International journal of simulation modelling, 2020, vol. 19(3), p. 446-457, DOI: 10.2507/IJSIMM19-3-526.
3. Popov A.A., Yablokova M.M. Optimizatsiya strukturnoy seti s pomoshch'yu imitatsionnogo komp'yuternogo modelirovaniya v srede anylogic [Optimization of the structure of a computer network by means of simulation modeling in the anylogic environment]. Informatsionnyye tekhnologii. Radioelektronika. Telekommunikatsii [Information technologies, Radio electronics, Telecommunications], 2016, no. 6-2, pp. 181-190, EDN WMFUSR.
4. Obukhov P.A., Nikolaev A.B. Razrabotka imitatsionnykh modeley v srede anylogic dlya issledovaniya effektivnosti raboty komp'yuternykh setey [Development of simulation models in the anylogic environment for studying the efficiency of computer networks]. Avtomatizatsiya i upravleniye v tekhnicheskikh sistemakh [Automation and control in technical systems], 2014, no. 4(12), pp. 71-81, DOI: 10.12731/2306-1561-2014-4-8, EDN TGMHBT.
5. Farashiani M.A., Muravyeva-Vitkovskaya L.A. Otsenka raspredeleniya parametrov nagruzki na kachestvo raboty komp'yuternoy seti [Assessment of the influence of the laws of distribution of load parameters on the quality of computer network functioning]. Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO: v 5 t., Sankt-Peterburg, 02-06 fevralya 2016 goda, Tom 5, Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki, [Almanac of scientific papers of young scientists of ITMO University : in 5 volumes, St. Petersburg, February 02-06, 2016, Volume 5, Saint Petersburg: Saint Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics], 2016, pp. 135-137, EDN ZOPGUJ.
6. Kanaev A.K., Oparin E.V., Oparina E.V. Model of the synchronization network functioning process in the context of intellectualization of network control functions. E3S Web Conf., 2020, vol. 224, 01028, DOI: 10.1051/e3sconf/202022401028
7. Ivanin A.N. Imitatsionnaya model' protsessa vklyucheniya transportnoy seti svyazi v usloviyakh realizatsii komp'yuternykh atak [Simulation model of the process of functioning of a transport communication network in the context of computer attacks]. Certificate of state registration of the computer program no. 2019667024 Russian Federation, 09.12.2019, publ. 18.12.2019, EDN RIMDJQ.
8. Shalna N.A., Storozheva A.A. Issledovaniye vozmozhnostey primeneniya metoda sistemno-dinamicheskogo modelirovaniya dlya prognozirovaniya virusnykh epidemiy v komp'yuternykh setyakh [Investigation of the possibility of using the method of system-dynamic modeling to predict viral epidemics in computer networks].

- Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik [Youth scientific and technical bulletin], 2017, no. 5, pp. 45, EDN ZRNHIT.
9. Semenov A.A. Mnogomodel'nyy podkhod k modelirovaniyu komp'yuternykh setey [A multi-model approach to computer network modeling]. Vestnik molodykh uchenykh PGNIU: sbornik nauchnykh trudov / otv. redaktor V.A. Byachkova; Permskiy gosudarstvennyy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet, Perm': Permskiy gosudarstvennyy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet [Bulletin of young scientists of the Russian State national research university, collection of scientific papers, editor-in-chief V.A. Byachkova, Perm state national research university, Perm, Perm state national research university], 2015, vol. 5, pp. 144-151, EDN WAUDYF.
 10. Veremchuk N.S. O razrabotke imitatsionnoy modeli po remontu komp'yuternoy tekhniki [On the development of a simulation model for the repair of computer equipment]. Obrazovaniye. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo: Sbornik materialov V Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Omsk, 28 aprelya – 29 2022 goda. – Omsk: Sibirskiy gosudarstvennyy avtomobil'no-dorozhnyy universitet (SibADI) [Education, Transport, Innovation, Author: Sergey Materalov At the National scientific and practical conference, Omsk, April 28 – April 29, 2022, Omsk: Siberian state automobile and road university (SibADI)], 2022, pp. 551-556, EDN RIXEPD.
 11. Matorin S.I. Determinantnaya model' sistemy i sistemologicheskoy analiz printsipov determinizma i beskonечnosti mira [Determinant model of the system and systemological analysis of the principles of determinism and the infinity of the world]. NTI, 1996, ser. 2, no. 8, pp. 1-8.
 12. Kostenko A.V. Printsip yedinogo resursa pri proyektirovani i proizvodstve detaley sudovykh dizeley [The principle of a single resource in the design and production of marine diesel parts]. Progressivnyye tekhnologii i sistemy mashinostroyeniya [Progressive technologies and mechanical engineering systems], 2018, no. 4(63), pp. 43-48, EDN XUXMKT.
 13. Java in AnyLogic: general information about using Java in Anylogic. Available at: <https://anylogic.help/ru/advanced/code/general.html> (accessed: 02/25/25).
 14. Rossikhina L.V. Agentnoye modelirovaniye zadachi raspredeleniya resursa [Agent-based modeling of the resource distribution problem]. Informatsionnyye tekhnologii v UIS [Information technologies in the UIS], 2024, no. 3, pp. 21-29, EDN ZLLDVL.
 15. Karpovich, A. I. Opredeleniye kategorii ustoychivosti v slozhnykh sotsiotekhnicheskikh voprosakh [Definition of the category of stability in complex socio-technical systems]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, Sotsial'no-ekonomicheskiye nauki [PNRPU Sociology and economics bulletin, social and economic sciences], 2017, no. 1, pp. 147-164, EDN YKJVBj.

Maltsev Nikita Dmitrievich. Student of the 4th year, department of mathematical modeling and digital development of business systems, Siberian state university of telecommunications and information science. AuthorID: 1288964, SPIN: 9795-2490, nikita.maltsevv@gmail.com, 630009, Russia, Novosibirsk, Kirova str., 86.

Poletaiкин Alexei Nikolaevich. Candidate of technical sciences, department of information technologies, Kuban state university. AuthorID: 768719, SPIN: 1142-5984, Scopus AuthorID: 57213829361, ORCID: 0000-0002-5128-1952, alex.poletaykin@gmail.com, 350040, Russia, Krasnodar, Stavropolskaya str., 149.

Danilova Lyubov Filippovna. Candidate of technical sciences, department of mathematical modeling and digital development of business systems, Siberian state university of telecommunications and information science. AuthorID: 992817, SPIN: 8125-9603, Scopus AuthorID: 57215304358, ORCID: 0000-0003-0907-0200, LubErmolenko@yandex.ru, 630009, Russia, Novosibirsk, Kirova str., 86.

Статья поступила в редакцию 21.01.2025; одобрена после рецензирования 06.03.2025; принята к публикации 22.04.2025.

The article was submitted 01/21/2025; approved after reviewing 03/06/2025; accepted for publication 04/22/2025.

УДК 519.237.5

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.006

Моделирующая программа для оценки финансового состояния денежного фонда с учетом отдельных работ по устранению инцидентов информационной безопасности

Краковский Юрий Мечеславович, Киргизбаев Владислав Павлович

Иркутский государственный университет путей сообщения,

Россия, Иркутск, 79149267772@yandex.ru

Аннотация. Предложена моделирующая программа по оценке финансового состояния денежного фонда, с учетом отдельных работ по устранению инцидентов информационной безопасности для корпоративной информационной системы. Математическое обеспечение этой программы основано на денежном фонде, в котором накапливаются, а затем расходуются необходимые финансовые средства. Из-за наличия сложных связей при взаимодействии этих потоков процесс, описывающий состояние фонда, получается нестационарным. Моделирование этого процесса – это первый этап работы моделирующей программы. Результатом этого этапа являются выборочные значения, используя которые, вычисляются точечные и интервальные оценки однофакторных и двухфакторных рисков. При создании моделирующей программы используется язык программирования Python версии 3.13. Проведена апробация моделирующей программы, получены научные и практические результаты. Показано, что если число видов платежей больше единицы, то доли платежей, а значит, и их размер, влияют на значения рисков, даже если число видов платежей одинаковое. Предложена и проверена функция, позволяющая аппроксимировать точечную оценку двухфакторного риска от коэффициента, влияющего на начальное значение случайного процесса.

Ключевые слова: имитационное моделирование, однофакторные и двухфакторные риски, показатели эффективности, случайный процесс

Цитирование: Краковский Ю.М. Моделирующая программа для оценки финансового состояния денежного фонда с учетом отдельных работ по устранению инцидентов информационной безопасности / Ю.М. Краковский, В.П. Киргизбаев // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2 (38). – С. 74-82. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.006.

Введение. На этапе интенсивного внедрения современных цифровых технологий большое значение приобретают средства защиты информации корпоративных информационных систем (КИС) предприятий. Эти средства защищают КИС от всевозможных угроз, чтобы обеспечить эффективность бизнеса, выполняемого организацией [1-3].

Использование различных мер защиты, включая правовые, организационные и технические меры, позволяет предотвращать различные инциденты, которые могут нанести ущерб организации. В соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002-2012 под инцидентом информационной безопасности понимают «следствие одного или нескольких нежелательных или неожиданных событий информационной безопасности, которые имеют значительную вероятность компрометации операций бизнеса или создания угрозы информационной безопасности» [3]. Эти угрозы необходимо устранить, реализуя некоторые работы, которые выполняются сотрудниками службы по информационной безопасности КИС предприятия.

Предлагаемая статья является развитием работы авторов [4], в которой выполнение работ происходит при ограниченных финансовых средствах на основе денежного (бюджетного) фонда (ДенФ). Этот фонд выполняет две основные функции: 1) в нем происходит накопление платежей, которые поступают с какой-то периодичностью (сут.) и какой-то величиной (тыс. руб.); поступления являются неслучайными величинами как для размеров, так и для интервалов; 2) по мере необходимости производится оплата работ, связанных с устранением инцидентов; в этом случае также определяется периодичность использования фонда (сут.) и стоимость этих работ (тыс. руб.). При этом интервалы времени между инцидентами и затраты для их устранения являются случайными величинами с

известными функциями распределений с точностью до значений числовых характеристик (математических ожиданий и коэффициентов вариации).

В результате взаимодействия денежных потоков возникает процесс, который в каждый момент времени определяет денежное состояние фонда. Отметим, что управлению денежными потоками посвящен один из разделов финансового менеджмента [5]. Управлению денежными потоками посвящены и работы по средствам защиты информации (СЗИ), в частности, работа [6], в которой сформулированы и решены две задачи ЛП: а) задача максимизации нижней границы функциональной эффективности программно-технических СЗИ и всех её компонентов при заданном ограничении на бюджет; б) задача минимизации бюджетных затрат для обеспечения заданного уровня функциональной эффективности этих средств. Решение подобных задач позволяет повысить эффективность соответствующих управленческих решений при ограничениях на финансовые ресурсы.

Целью данной работы является создание и апробация моделирующей программы для оценки и визуализации показателей эффективности работ по устранению инцидентов информационной безопасности.

1. Математическое обеспечение задачи. Состояние ДенФ предлагается описать случайным нестационарным процессом вида:

$$Fs(t) = Fs_0 + \sum_{l=1}^L Y_l(t) - \sum_{j=1}^m Z_j(t) \quad (1)$$

где Fs_0 – начальное значение процесса $Fs(t)$, тыс. руб.; $Y_l(t)$ – суммарная величина доходов по платежам l -го вида за время t , тыс. руб.; L – число видов платежей по пополнению ДенФ; $Z_j(t)$ – суммарная величина расходов для j -й работы за время t , тыс. руб.; m – число видов работ по устранению инцидентов информационной безопасности.

Отметим, что по сравнению с работой [4] изменена модель процесса (1). Платежи и расходы на оплату работ сделаны независимыми: m – число видов работ, L – число видов платежей. В цитируемой работе число видов платежей равно числу видов работ. Это изменение позволяет сделать число видов платежей и их периодичность управляющими факторами, влияющими на эффективность организации работ по устранению инцидентов;

В модели (1):

$$Z_j(t) = \sum_{q=1}^{N_j(t)} z_{qj}, \text{ тыс. руб.}, \quad (2)$$

где z_{qj} – величина q -го расхода для j -й работы; $N_j(t)$ – число этих расходов за время t ;

$$Y_l(t) = Y_{0l} \cdot N_{0l}(t), \text{ тыс. руб.}, \quad (3)$$

где Y_{0l} – значение единичного платежа l -го вида при пополнении ДенФ, тыс. руб. (эти величины рассчитываются); $N_{0l}(t)$ – число платежей l -го вида за время t .

Величину Fs_0 предлагается задавать в долях от величины средних годовых расходов

$$Fs_0 = g \cdot X, \text{ тыс. руб.}, \quad (4)$$

где X – средние финансовые средства (тыс. руб.), необходимые для выполнения годового объема всех работ (расходы); g – коэффициент.

Финансовые средства (тыс. руб.), необходимые для выполнения годового объема работ (расходы) для j -го вида работ, в среднем равны:

$$X_{0j} = Tg \cdot (mz_j / mt_j), \text{ тыс. руб.}, \quad (5)$$

где Tg – число суток в году; mt_j , mz_j – математические ожидания вероятностных моделей интервалов времени и величин затрат;

С учетом (5) суммарные средства по всем видам работ в среднем равны:

$$X = \sum_{j=1}^m X_{0j}, \text{ тыс. руб.}, \quad (6)$$

Средний размер платежа l -го вида за год равен:

$$P_{0l} = c_l \cdot X, \quad \sum_{l=1}^L P_{0l} = X, \quad \sum_{l=1}^L c_l = 1, \quad (7)$$

где c_l – доли платежей l -го вида при пополнении ДенФ (исходная информация).

Исходя из (7), средняя суммарная величина доходов за год должна быть равна средней суммарной величине расходов за год.

Чтобы учесть рекомендации теории рисков [7], вводится величина Fs_0 . В этом случае доход превышает расход.

Значение единичного платежа l -го вида при пополнении ДенФ:

$$Y_{0l} = P_{0l} / N_l = (c_l \cdot h_l \cdot X) / Tg, \quad (8)$$

где $N_l = Tg/h_l$ – среднее число l -ых платежей за год; h_l – значение интервала времени между поступлениями платежей l -го вида при пополнении ДенФ, сут.

Введем понятие времени обнуления ДенФ.

Пусть s – время, когда в ДенФ закончились деньги на оплату работ, сут. Назовем его временем обнуления ДенФ; S – случайная величина, для которой определяется время s ; $(S < S_t)$ – негативное случайное событие, заключающееся в том, что обнуление ДенФ произошло на интервале $(0, S_t)$, сут.

Время обнуления равно:

$$s = \min_t (t : Fs(t) < 0), \text{ сут.} \quad (9)$$

При имитационном моделировании для времени s образуется упорядоченная по возрастанию выборка объема n :

$$Ts = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_n), \quad (10)$$

где i – номер элемента выборки (номер реализации процесса (1), для которой произошло обнуление ДенФ).

В предыдущих исследованиях рассматривалась однофакторная модель риска, как вероятность негативного события $p_t = P(S < S_t)$, которая при имитационном моделировании заменяется на точечную и интервальную оценки. Точечная оценка имеет вид:

$$\tilde{R}_\tau = k_\tau / n_0; \quad (11)$$

определение интервальной оценки (τ_1, τ_2) можно посмотреть в работе [8].

В данной работе дополнительно предлагается двухфакторный риск вида:

$$RD2 = M[p_0 \cdot Dr], \text{ тыс. руб.} \quad (12)$$

Здесь p_0 – вероятность обнуления ДенФ; Dr – случайная величина, характеризующая итоговые расходы фонда до времени его обнуления; $M[\cdot]$ – математическое ожидание произведения этих величин.

Введём выборку Q оценок вероятности p_0 (q_i) для i -й реализации процесса (1) после упорядочивания по возрастанию выборки (10):

$$Q = (q_1, \dots, q_i, \dots, q_n), \quad q_i = i/n_0; \quad (13)$$

среднее значение оценки вероятности p_0 на интервале $(0, S_t)$ равно:

$$q_0 = \sum_{i=1}^{k_\tau} q_i / k_\tau = (k_\tau + 1) / (2 \cdot n_0). \quad (14)$$

Здесь n_0 – число реализаций процесса (1) при имитационном моделировании; k_τ – количество реализаций процесса, когда случайное событие $(S < S_t)$ произошло.

Введем выборку:

$$D2 = (q_1 \cdot d_1, \dots, q_i \cdot d_i, \dots, q_n \cdot d_n), \quad (15)$$

Здесь d_i – итоговое значение расходов по всем работам до времени s_i :

$$d_i = \sum_{j=1}^m Z_j(s_i), \quad (16)$$

где $Z_j(s_i)$ – величина (2), когда число расходов определяется до времени s_i включительно; q_i – величина (13).

При имитационном моделировании риск (12) заменяется на точечную и интервальную оценки:

$RD2_0$ – точечная оценка величины $RD2$ (12), оценивающая средние расходы на интервале $(0, S_t)$:

$$RD2_0 = \sum_{i=1}^{k_r} q_i \cdot d_i / k_r, \text{ тыс. руб.} \quad (17)$$

где d_i – величина (16), а q_i – величина (13); $(RD2_1, RD2_2)$ – интервальная оценка величины $RD2$

$$RD2_1 = RD2_0 - (z_\gamma \cdot \sigma_{d2}) / \sqrt{k_r}, \quad (18)$$

$$RD2_2 = RD2_0 + (z_\gamma \cdot \sigma_{d2}) / \sqrt{k_r}, \quad (19)$$

где σ_{d2} – оценка среднеквадратического отклонения величины $(p_0 \cdot Dr)$ на интервале $(0, S_t)$; $z_\gamma = 1,96$ – критическое значение статистики Z при доверительной вероятности $\gamma = 0,95$.

2. Программное обеспечение решения задачи. Для разработки моделирующей программы (МП) на основе дискретно-имитационного моделирования используется язык программирования Python версии 3.13. Данный язык программирования является интерпретируемым, поэтому после изменения кода программу можно сразу запускать без предварительной компиляции, при этом по производительности Python лишь немного уступает большинству компилируемых языков [9].

В разработанной программе, кроме модулей из стандартной библиотеки Python (csv, io, os, sys, time, math), используется также ряд сторонних библиотек:

- numpy – для векторных вычислений, а также для генерации векторов случайных чисел;
- scipy – для расчёта критических значений для F-распределения при известных степенях свободы и доверительной вероятности, а также для генерации векторов случайных чисел с заданным распределением;
- PySide6 – для создания графических пользовательских интерфейсов с использованием фреймворка Qt6;
- matplotlib – для построения гистограмм и графиков;
- openpyxl – для вывода результатов моделирования в файлы Microsoft Excel (*.xlsx).

МП может быть запущена на любой платформе, для которой существует совместимый интерпретатор языка программирования Python версии 3.13, поддерживающий установку сторонних библиотек, и которая совместима с фреймворком Qt6 (в том числе Windows 8.1/10/11, последние версии Linux и MacOS).

В работе [4] показано влияние вероятностных моделей, содержащих виды и числовые характеристики законов распределения для интервалов между инцидентами и затрат на их устранение, на значения показателей эффективности. В связи с этим, МП содержит специальный интерфейс для ввода этих данных (рис. 1)

Выбор этих вероятностных моделей производится с помощью выпадающих списков, сокращения в которых обозначают следующие виды законов распределения: «Рв» – равномерное распределение, «Н» – нормальное распределение, «Лн» – логнормальное распределение, «Б» – бета-распределение, «Г» – гамма-распределение, «В» – распределение

Вейбулла, «П» – распределение Парето с нулевой точкой, «Б-С» – распределение Бирнбаума-Саундерса. Возможно изменение этих моделей и по числу, и по видам.

Также в данном интерфейсе (рис. 1) происходит ввод математических ожиданий (mt , mz) и коэффициентов вариации (kvt , kvz) для выбранных вероятностных моделей.

Вероятностные модели					
	1	2	3	4	5
Модели для инт. врем.:	Н ▾	Б ▾	Рв ▾	Б ▾	Н ▾
М. о. для инт. врем. mt (сут.):	18 ▴ ▾	24 ▴ ▾	28 ▴ ▾	6 ▴ ▾	22 ▴ ▾
Коэф. вар. для инт. врем. kvt :	0,20 ▴ ▾	0,10 ▴ ▾	0,10 ▴ ▾	0,10 ▴ ▾	0,10 ▴ ▾
Модели для велич. затрат:	Лн ▾	Б-С ▾	П ▾	Лн ▾	Г ▾
М. о. для вел. затрат mz (т. р.):	380 ▴ ▾	340 ▴ ▾	200 ▴ ▾	120 ▴ ▾	250 ▴ ▾
Коэф. вар. для вел. затрат kvz :	0,15 ▴ ▾	0,20 ▴ ▾	1,25 ▴ ▾	0,25 ▴ ▾	0,15 ▴ ▾

Рис. 1. Интерфейс МП для ввода вероятностных моделей

МП содержит и другие интерфейсы для ввода необходимых исходных данных.

Результатом моделирования являются выборки (9), (13), (15), которые затем обрабатываются специальным образом. После их обработки получаются три группы результатов:

- 1) показатели эффективности;
- 2) гистограммы частот;
- 3) другая информация, необходимая для визуализации результатов моделирования.

3. Результаты апробации моделирующей программы. Внедрение разработанной МП проведено в акционерном обществе «Восточно-Сибирский центр ЕВРААС». АО «ВСЦ ЕВРААС» осуществляет работы по обеспечению информационной безопасности в региональных органах государственной власти, органах местного самоуправления и организациях (в том числе в государственных корпорациях) Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края.

Ввиду того, что большая часть заказчиков АО «ВСЦ ЕВРААС» финансируется за счет бюджетных средств, они довольно часто обращаются в АО «ВСЦ ЕВРААС» за рекомендациями, какую сумму расходов им необходимо запланировать на следующий календарный год. В связи с этим для обоснования необходимых средств рекомендуется использовать созданное математическое обеспечение и разработанную МП.

Экспертами выделены пять видов работ:

1. Поддержка и модернизация программных средств защиты информации.
2. Восстановление работоспособности технических и программно-аппаратных средств защиты информации.
3. Резервное копирование важной информации (облачное хранение, зеркалирование и т.д.).
4. Поддержка, восстановление и модернизация средств защиты информации для сложных сетевых инфраструктур (Dallas Lock и т. д.).
5. Поддержка и модернизация криптографических средств защиты информации, включая программно-аппаратные комплексы.

В таблице 1 приведены исходные данные для выбранных работ (вероятностные модели и их числовые характеристики), предложенные экспертами для апробации.

Для выбранных значений (табл. 1) общие средние расходы, необходимые для выполнения годового объема всех работ (6), равны $X = 26931,26$ тыс. руб. Коэффициент g в данной апробации равен 0,04.

Таблица 1. Вероятностные модели и их числовые характеристики

j	1	2	3	4	5
В. м. для интер.	Н	Б	Рв	Б	Н
mt_j , сут.	18,0	24,0	28,0	6,0	22,0
kvt_j	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10
В. м. для затрат	Лн	Б-С	П	Лн	Г
mz_j , тыс. руб.	380,0	340,0	200,0	120,0	250,0
kvz_j	0,15	0,20	1,25	0,25	0,15

Исследование проведем по влиянию величины L и связанных с ней исходных данных для таких вариантов (В): $C - L = 1$, $h = 1$ сут. ($c_1 = 1$), для этого варианта платеж (8) равен $Y_{01} = 73.78$ тыс. руб.; $D1 - L = 3$, $h = 3, 5, 7$ сут., $c_1 = 0.3333$, $c_2 = 0.3333$, $c_3 = 0.3334$, для этого варианта платежи (8) равны $Y_{01} = 73.78$, $Y_{01} = 122.96$, $Y_{01} = 172.20$ тыс. руб.; $D2 - L = 3$, $h = 3, 5, 7$ сут., $c_1 = 0.20$, $c_2 = 0.35$, $c_3 = 0.45$, для этого варианта платежи (8) равны $Y_{01} = 44.27$, $Y_{01} = 129.12$, $Y_{01} = 232.42$ тыс. руб.

В таблице 2 приведены результаты моделирования по показателям эффективности для выбранных вариантов.

Таблица 2. Результаты моделирования

В	S_t , сут.	k_t	$\tilde{R}_t$	τ_1	τ_2	RD_{20}	RD_{21}	RD_{22}	Δ , %
C	91	2125	0,0213	0,0205	0,0220	71,16	68,96	73,36	3,09
	182	6791	0,0679	0,0666	0,0692	393,43	386,38	400,49	1,79
	273	11827	0,1183	0,1166	0,1200	952,63	939,21	966,06	1,41
	365	16592	0,1659	0,164	0,1679	1694,81	1673,98	1715,64	1,23
D1	91	3213	0,0321	0,0312	0,0331	105,34	102,69	107,99	2,52
	182	9409	0,0941	0,0926	0,0956	531,54	523,33	539,75	1,54
	273	15569	0,1557	0,1538	0,1576	1218,08	1202,82	1233,35	1,25
	365	21162	0,2116	0,2095	0,2138	2095,15	2071,85	2118,45	1,11
D2	91	3455	0,0345	0,0336	0,0355	112,54	109,81	115,27	2,43
	182	9857	0,0986	0,097	0,1001	551,43	543,07	559,78	1,52
	273	16347	0,1635	0,1615	0,1654	1271,73	1256,15	1287,31	1,23
	365	22068	0,2207	0,2185	0,2228	2171,18	2147,44	2194,91	1,09

Число реализаций при моделировании равно 100000, но объемы обрабатываемых выборок (15) равны k_t . В таблице 2 приведена относительная погрешность в процентах:

$$\Delta = (RD_{22} - RD_{21}) \cdot 100 / (2 \cdot RD_{20}). \quad (20)$$

С увеличением объема выборки ($S_t > 91$ сут.) погрешность становится менее 2%, что можно считать хорошей точностью вычислений.

Анализируя результаты таблицы 2, можно сделать такие выводы:

1) наименьшие риски наблюдаются для варианта C, когда $L = 1$; был проведен дополнительный расчет при $h = 3$ сут.; риски увеличились, но оказались значительно меньше, чем для вариантов D1 и D2, тем самым можно констатировать, что при $L = 1$ риски меньше и для других h по сравнению с $L > 1$;

2) риски для варианта D1 значительно меньше, чем для варианта D2 (доверительные интервалы не пересекаются); таким образом, доли платежей, а значит, и их размер, влияют на значения рисков, даже если число платежей L одинаковое.

На рисунке 2 приведена гистограмма частот выборки (15) для варианта D2 при $S_t = 365$ сут. Данная гистограмма частот содержит 35 интервалов, длина интервала 200 тыс. руб. По оси абсцисс приведены верхние границы каждого из интервалов (тыс. руб.), по оси ординат и над столбцами гистограммы – частоты. Из гистограммы видно, что при увеличении числа

интервалов частоты имеют тенденцию к уменьшению, однако этот процесс происходит неравномерно из-за случайности выборочных значений.

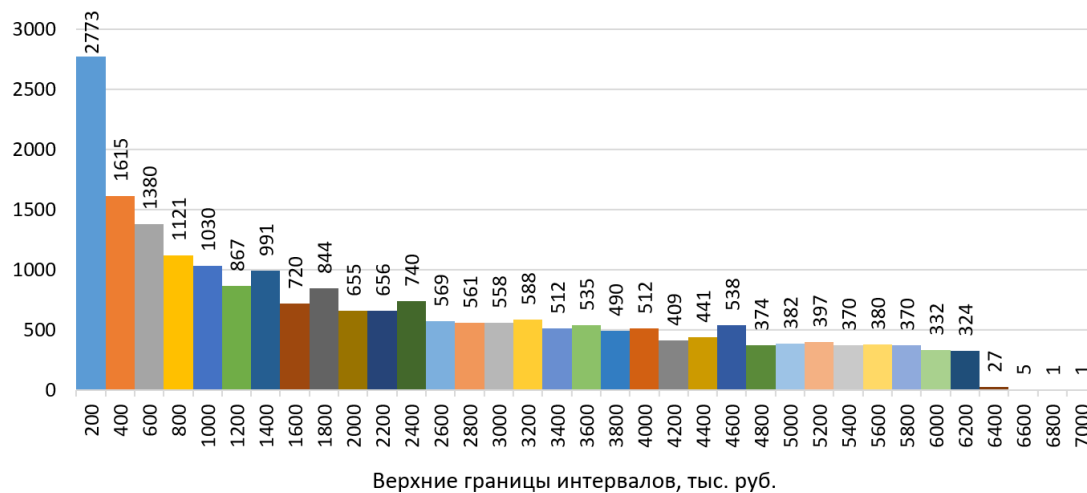


Рис. 2. Гистограмма частот для выборки (15), вариант D2, $S_t=365$ сут.

В работе дополнительно проведено исследование по влиянию коэффициента g (4) на величину двухфакторного риска (17). На рисунке 3 представлена аппроксимация точечной оценки $RD2_0$ функцией, зависящей от коэффициента g для варианта D1. Аппроксимация проведена функцией:

$$y_d(g) = A \cdot e^{-a \cdot g} \quad (21)$$

при $S_t = 273$ сут.: $A = 4086,54$; $a = 32,05$; наблюдается хорошая аппроксимация (коэффициент детерминации 0,99).

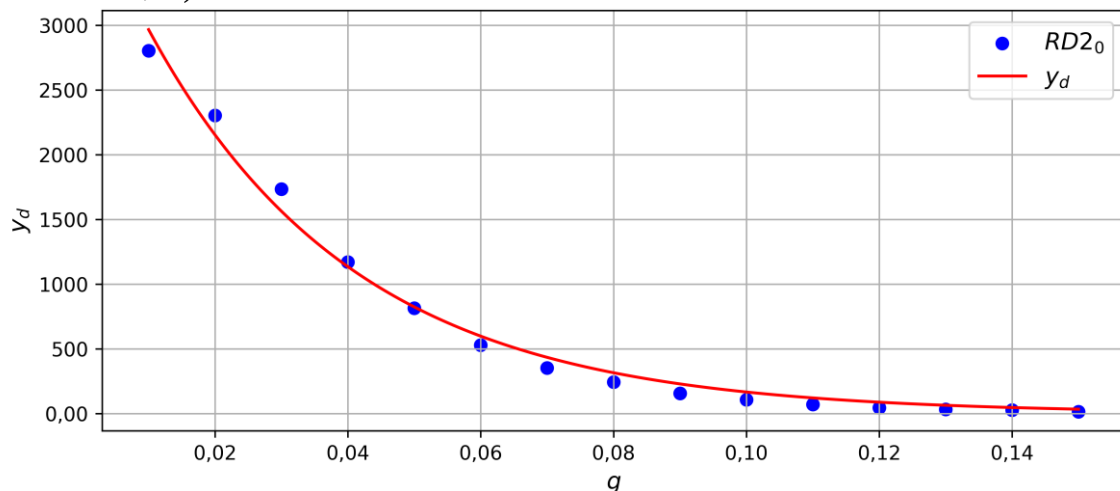


Рис. 3. Аппроксимация точечной оценки $RD2_0$ функцией (21) при $S_t = 273$ сут.

Из рисунка 3 видно, что при увеличении g точечная оценка $RD2_0$ монотонно уменьшается, достигая при g больше 0,12 значений, близких к нулю. Этот вывод о монотонном уменьшении подтверждается и для других значений S_t .

Заключение. Доработана и апробирована моделирующая программа по оценке эффективности работ по устранению инцидентов информационной безопасности для корпоративной информационной системы. Используя эту программу, проведено исследование по влиянию числа поступлений в ДенФ на показатели эффективности в виде точечных и интервальных оценок однофакторных и двухфакторных рисков. Получены практические рекомендации, имеющие научное значение. В частности, показано, что наименьшие риски наблюдаются для варианта, когда $L = 1$, $h = 1$ сут. Также показано, что если число видов платежей больше единицы, например, $L = 3$, то доли платежей, а значит и их размер, влияют на значения рисков даже если число видов платежей одинаковое.

Предложена и проверена функция вида (21), позволяющая аппроксимировать точечную оценку двухфакторного риска (17) RD_{20} от коэффициента g , влияющего на начальное значение процесса (1). С увеличением этого значения показатель эффективности монотонно уменьшается до значений, близких к нулю. Коэффициент детерминации при аппроксимации экспериментальных значений, полученных по МП функцией (21), равен 0,99.

Предлагаемая моделирующая программа рекомендуется службам информационной безопасности организаций для оценки показателей эффективности, необходимых для анализа экономических вопросов при защите информации.

Список источников

1. Верещагин И.Ю. Современные угрозы и риски информационной безопасности корпоративных систем в условиях импортозамещения / И.Ю. Верещагин // Вестник Евразийской науки, 2024. – Т 16. – Приложение к выпуску № 4. – URL: <https://esj.today/PDF/28FAVN424.pdf> (дата обращения: 01.02.2025).
2. Кондауров С.Н. Проблемы обеспечения информационной безопасности в корпоративных сетях / С.Н. Кондауров, А.В. Бунина, А.В. Митрофанов // Современные информационные технологии и информационная безопасность: сборник научных статей 3-й Всероссийской научно-технической конференции. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 69-72.
3. Краковский Ю.М. Методы и средства защиты информации / Ю.М. Краковский. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 272 с.
4. Краковский Ю.М. Влияние вероятностных моделей работ, связанных с защитой информации, на значения показателей эффективности / Ю.М. Краковский, В.П. Киргизбаев // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 3(35). – С. 112-119. – DOI: 10.25729/ESI.2024.35.3.010.
5. Ван Хорн Д.К., Вахович Д.М. Основы финансового менеджмента / Д.К. Ван Хорн, Д.М. Вахович. – М.: Вильямс, 2019. – 627 с.
6. Базилевский М.П. Формализация модели информационной безопасности предприятия в виде многокритериальной задачи линейного программирования / М.П. Базилевский, П.Н. Наседкин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2023. – Т. 11. – № 3(42). – С. 10-11. – DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.021.
7. Королев В.Ю. Математические основы теории рисков / В.Ю. Королев, В.Е. Бенинг, С.Я. Шоргин – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 620 с.
8. Краковский Ю.М. Программно-математическое обеспечение для исследования показателей эффективности экономики информационной безопасности / Ю.М. Краковский, В.П. Киргизбаев // System analysis and mathematical modeling, 2024. – Т. 6. – № 2. – С. 209-220. – DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(2).209-220.
9. Лутц М. Изучаем Python / М. Лутц. – СПб.: ООО «Диалектика», 2019. – Том 1. – 832 с.

Краковский Юрий Мечеславович. Доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения. Elibrary AuthorID: 100083, SPIN: 3616-8715, ORCID: 0000-0003-4876-0618, 79149267772@yandex.ru, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15.

Киргизбаев Владислав Павлович. Аспирант кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения. Elibrary AuthorID: 1198836, SPIN: 1825-7084, ORCID: 0009-0009-4713-8502, v.p.kirgizbaev@gmail.com, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15.

UDC 519.237.5

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.006

Simulation program for assessing the financial health of a monetary fund accounting for specific information-security incident remediation activities

Yuri M. Krakovskii, Vladislav P. Kirgizbaev

Irkutsk state transport university,
Russia, Irkutsk, 79149267772@yandex.ru

Abstract. A simulation program has been developed to assess the financial status of a monetary fund while explicitly accounting for the discrete costs of remediating information-security incidents within a corporate information system. The program's mathematical core models a fund that first accumulates and then expends the requisite financial resources; the intricate coupling of these inflow and outflow streams renders the underlying stochastic process non-stationary. Simulating this process constitutes the program's first stage, yielding sample path data from which point and interval estimates of single-factor and two-factor risks are derived. The implementation is written in Python 3.13. Experimental validation produced both scientific insights and practical outcomes. In particular, when the number of payments exceeds one, the distribution – and consequently the magnitude – of those payments markedly influences risk values even for the same payment count. Finally, a function is proposed and verified that approximates the point estimate of the two-factor risk as a function of a coefficient affecting the initial value of the stochastic process.

Keywords: simulation modeling; single-factor and two-factor risks; performance indicators; stochastic process

References

1. Vereshchagin I.Y. Sovremennye ugrozy i riski informatsionnoj bezopasnosti korporativnyh sistem v usloviyah importozameshheniya [Modern threats and risks of information security of corporate systems in the context of import substitution]. Vestnik Evrazijskoj nauki [Bulletin of Eurasian Science], 2024, vol. 16, suppl. to no. 4, available at: <https://esj.today/PDF/28FAVN424.pdf> (accessed: 02/01/2025).
2. Kondauronov S.N., Bunina A.V., Mitrofanov A.V. Problemy obespecheniya informatsionnoj bezopasnosti v korporativnyh setyah [Problems of ensuring information security in corporate networks]. Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i informatsionnaya bezopasnost': sbornik nauchnykh statey 3-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Kursk: ZAO "Universitetskaya kniga" [Modern information technologies and information security: collection of scientific articles of the 3rd All-Russian scientific and technical conference, Kursk: ZAO "Universitetskaya kniga"], 2024, pp. 69-72.
3. Krakovskii Y.M. Metody i sredstva zashchity informatsii [Methods and means of information protection]. Sankt-Peterburg: Lan' [St. Petersburg, Lan' Publ.], 2024, 272 p.
4. Krakovskii Y.M., Kirgizbaev V.P. Vliyanie veroyatnostnykh modeley rabot, svyazannykh s zashhitoy informatsii, na znacheniya pokazateley jeffektivnosti [The influence of probabilistic models of information-protection processes on the values of efficiency indicators]. Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no. 3(35), pp. 112-119, DOI: 10.25729/ESI.2024.35.3.010
5. Van Horne J.C., Wachowicz J. M. Osnovy finansovogo menedzhmenta [Fundamentals of financial management]. M.: Vil'yams [Moscow, Williams], 2019, 627 p.
6. Bazilevskij M.P., Nasedkin P.N. Formalizatsiya modeli informatsionnoj bezopasnosti predpriyatiya v vide mnogokriterial'noj zadachi linejnogo programmirovaniya [Formalization of an enterprise information security model as a multi-criteria linear programming problem]. Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii [Modeling, optimization and information technologies], 2023, vol. 11, no. 3(42), pp. 10-11, DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.021.
7. Korolev V.Y., Bening V.E., Shorgin S.Y. Matematicheskie osnovy teorii riskov [Mathematical foundations of risk theory]. M.: FIZMATLIT [Moscow, FIZMATLIT], 2011, 620 p.
8. Krakovskii Y.M., Kirgizbaev V.P. Programmno-matematicheskoe obespechenie dlya issledovaniya pokazateley jeffektivnosti ekonomiki informatsionnoj bezopasnosti [Software and mathematical tools for the study of information security economics efficiency indicators]. System analysis and mathematical modeling, 2024, vol. 6, no. 2, pp. 209-220, DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(2).209-220.
9. Lutz M. Izuchaem Python [Learning Python]. SPb.: OOO "Dialektika" [St. Petersburg, Dialektika], 2019, vol. 1, 832 p.

Krakovskii Yuri Mecheslavovich. Doctor of Engineering, Professor of the Department of Information Systems and Security Information, Irkutsk State Transport University. Elibrary AuthorID: 100083, SPIN: 3616-8715, ORCID: 0000-0003-4876-0618, 79149267772@yandex.ru, 664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevskogo str., bld. 15

Kirgizbaev Vladislav Pavlovich. PhD Student of the Department of Information Systems and Security Information, Irkutsk State Transport University. Elibrary AuthorID: 1198836, SPIN: 1825-7084, ORCID: 0009-0009-4713-8502, v.p.kirgizbaev@gmail.com, 664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevskogo str., bld. 15.

Статья поступила в редакцию 23.03.2025; одобрена после рецензирования 05.05.2025; принята к публикации 05.05.2025.

The article was submitted 03/23/2025; approved after reviewing 05/05/2025; accepted for publication 05/05/2025.

УДК 621.9:519.242

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.007

Планирование и обработка результатов экспериментов при шлифовании

Каширская Елизавета Натановна

МИРЭА – Российский технологический университет,
Россия, Москва, liza.kashirskaya@gmail.com

Аннотация. Качество поверхности детали, образованной технологическим процессом резания, оценивается геометрическими и физико-механическими параметрами. Шлифование используется, как конечная операция обработки, в связи с чем наибольшую важность приобретает точность полученной поверхности. В понятие точности входят три составляющих: отклонение формы и расположения поверхности, волнистость и шероховатость. В статье излагаются результаты исследования влияния режимов шлифования на один из показателей точности обработки резанием – шероховатость шлифованной поверхности.

Ключевые слова: шлифование, режимы резания, подача, скорость подачи, глубина резания, планирование эксперимента, статистическая обработка

Цитирование: Каширская Е.Н. Планирование и обработка результатов экспериментов при шлифовании / Е.Н. Каширская // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2 (38). – С. 83-89. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.007.

Введение. Исследованием качества поверхности заготовки, обработанной шлифованием, занимались и занимаются многие авторы. Так, например, статья [1] посвящена исследованию влияния режимов шлифования на качество поверхности. Авторы представили некоторые результаты экспериментального исследований процесса шлифования деталей на качество поверхностей. Статья [2] посвящена изучению связи шероховатости поверхности с силой резания при глубинном шлифовании. В ней показана связь значения параметров шероховатости [3] с длиной шлифованной поверхности, от которой зависит накопленная сила резания. Авторы работы [4], рассматривая круглое шлифование, на основании проведенных экспериментальных исследований пришли к выводу о значительном влиянии режимов резания на геометрию поверхности, обработанной шлифовальным кругом. Результаты теоретического исследования качества поверхности детали при шлифовании [5] свидетельствуют о значительном влиянии режимов резания на результат обработки заготовки. Общим вопросам обеспечения точности при шлифовании посвящена работа [6], в которой разработаны математические модели точности круглого шлифования с учетом динамики и кинематики процесса обработки. В работе [7] приведены результаты экспериментального исследования качества поверхности, обработанной шлифованием и определены диапазоны скоростей резания, обеспечивающие снижение шероховатости.

Приведенные в данном обзоре работы, а также многие другие свидетельствуют о важности разработки общей методики определения влияния режимов резания на качество шлифованной поверхности.

Качество поверхности обработанной детали определяется тремя параметрами: геометрической точностью, шероховатостью и физико-механическими свойствами поверхностного слоя. Понятие точности включает в себя допуск на отклонения формы и расположения поверхностей [8]. Физико-механические свойства поверхностного слоя определяются величиной остаточных напряжений и глубиной наклепа. Влияние большого числа технологических факторов на формирование характеристик качества поверхности при обработке материалов резанием затрудняет оценку зависимости отдельных параметров качества от режимов обработки. Получение более полных зависимостей возможно на базе современных математических методов планирования эксперимента и дальнейшей обработки полученных результатов [9].

Исследование проводится на примере плоского шлифования [10] периферией шлифовального круга на станке с прямоугольным столом (Рис. 1).

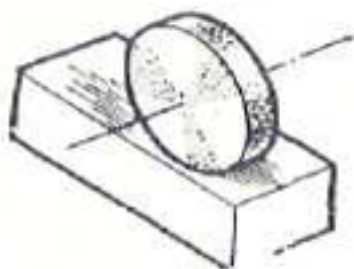


Рис.1. Схема плоского шлифования

Шлифование, как правило, является финишной обработкой заготовки и формирует наиболее важный параметр качества обработанной поверхности – ее шероховатость [4].

ГОСТ [11] устанавливает основные требования к шероховатости поверхности детали и регламентирует параметры шероховатости, наиболее значимыми из которых являются Ra – среднее арифметическое отклонение профиля и Rz – высота неровностей профиля по десяти экстремальным точкам.

В настоящих исследованиях рассматривалось влияние скорости продольной подачи детали V , поперечной подачи S и глубины шлифования t на шероховатость шлифованной поверхности (параметр Ra – среднее арифметическое отклонение профиля).

Для исследования принят полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^3 , так как рассматриваются три независимых параметра процесса шлифования.

1. Выбор математической модели. Существуют три конкурирующие гипотезы выбора математической модели, отображающие взаимосвязь между параметрами технологического процесса и результатами процесса шлифования:

- 1-я гипотеза – математическая модель первого порядка,
- 2-я гипотеза – математическая модель второго порядка,
- 3-я гипотеза – математическая модель в виде степенной функции.

Вид зависимости шероховатости поверхности от параметров режима резания известен из теории резания. Эта зависимость имеет следующий вид:

$$Ra = C_{Ra} V^{x_1} S^{x_2} t^{x_3}, \quad (1)$$

где Ra – среднее арифметическое значение всех абсолютных расстояний профиля шероховатости от центральной линии в пределах длины измерения, мкм,

V – скорости продольной подачи детали, м/мин,

S – поперечная подача, мм/ход стола,

t – глубина шлифования, мм,

C_{Ra} – коэффициент пропорциональности.

Это позволяет принять математическую модель по 3-ей гипотезе. В этом случае задачей эксперимента является определение коэффициентов, входящих в формулу (1).

2. Линеаризация математической модели. Для вычисления коэффициентов расчетных зависимостей математическая модель (1) мультипликативного типа с помощью логарифмирования приводится к линейному виду следующим образом:

$$\ln Ra = C_{Ra} + x_1 \ln V + x_2 \ln S + x_3 \ln t. \quad (2)$$

Введем новые обозначения:

$$y = \ln Ra, x_0 = \ln C_{Ra}, b_1 = \ln V, b_2 = \ln S, b_3 = \ln t.$$

С учетом вновь введенных обозначений формула (2) сводится к виду:

$$y = x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3. \quad (3)$$

3. Планирование проведения трехфакторного эксперимента. Прежде чем получать и обрабатывать опытные данные, определимся с уровнями их значимости. Уровни значимости для опытных данных закодированы специальным образом: нижний уровень соответствует -1 (обозначен как минус), а верхний +1 (обозначен как плюс). Кодовые обозначения в серии опытов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Кодовые обозначения			
	x_0	x_1	x_2	x_3
1	+	-	-	-
2	+	-	-	+
3	+	+	-	-
4	+	+	-	+
5	+	-	+	-
6	+	-	+	+
7	+	+	+	-
8	+	+	+	+

4. Вычисление коэффициентов математической модели. Вычисление коэффициентов x_0, b_1, b_2, b_3 математической модели (3) рассматриваемого процесса производится методом наименьших квадратов при помощи регрессионного анализа. Задачей исследовательских расчетов является определение коэффициентов зависимости (3), при этом необходимо оценить значимость полученных в эксперименте результатов [12].

В исследовании выполняется статистическая оценка результатов опыта по двум критериям. Оценка воспроизводимости опытов проводится по критерию Кохрена [13], характеризующему допустимое расхождение результатов измерений. Оценка значений полученных параметров проводится по критерию Фишера, с помощью которого сопоставляется дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта) с дисперсией адекватности (ошибка, появляющаяся при сравнении эмпирических данных с данными, рассчитанными по принятой зависимости).

5. Статистическая обработка результатов эксперимента. Обработка результатов экспериментов проводится в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Ввод исходных данных:

- m – число параллельных опытов;
- табличное значение критерия Кохрена при 5%-ном уровне значимости $G(0,05; f; f_i) = 0,5157$, где $f_n = 8$ – число независимых оценок дисперсии, $f_i = 2$ – число степеней свободы каждой оценки;
- табличное значение критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости $F(0,05;$
- $f_{ад}; f_i) = 3,0069$, где $f_{ад} = 4$ – число степеней свободы дисперсии адекватности, $f_i = 16$ – число степеней свободы дисперсии воспроизводимости;
- коэффициент матрицы планирования X_{ij} ;
- экспериментально полученные значения Ra :

$$Y_i \text{ при } 1 \leq i \leq 8, 1 \leq k \leq m.$$

2. Вычисление среднего значения шероховатости на i -ом сочетании уровней факторов:

$$Y_{cp\ i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m Y_{ik}.$$

3. Определение дисперсии, характеризующей рассеяние результатов опытов на i -ом сочетании уровней факторов:

$$s_i^2 = \frac{\sum_{k=1}^m (Y_{ik} - Y_{cp\ i})^2}{m - 1}$$

4. Выявление наибольшей из дисперсий в строчках плана:

$$s_{i\ max}^2.$$

5. Проверка воспроизводимости опытов по критерию Кохрена:

- а) вычисление критерия Кохрена $G = \frac{s_{i\ max}^2}{\sum_{i=1}^8 s_i^2}$, где $n=8$ – число строчек плана;
- б) сравнение G и $G(0,05; fn; fi)$: процесс считается воспроизводимым, если $G \leq G(0,05; fn; fi)$; если $G > G(0,05; fn; fi)$, следует уточнить измерения в опыте с максимальной дисперсией;
- с) определение дисперсии воспроизводимости $s_Y^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 s_i^2}{m}$, где $n=8$ – число строчек плана.

6. Расчет коэффициентов регрессии для воспроизводимого процесса:

$$x_0 = \frac{\sum_{k=1}^n \ln Y_{k\ cp}}{n}, \quad b_i = \frac{\sum_{k=1}^n x_{ij} \ln Y_{k\ cp}}{n},$$

где $j = 1, 2, 3$, то есть $j \leq k$,

k – количество столбцов плана.

7. Определение параметров расчетной зависимости $Y = a_0 V^{a_1} S^{a_2} t^{a_3}$.

8. Определение расчетных значений отклика Y_i в каждом из n опытов.

9. Проверка адекватности модели по критерию Фишера:

- а) нахождение $s_{ад}^2 = \frac{\sum_{k=1}^8 (Y_{cp\ i} - Y)^2}{n - k - 1}$;
- б) вычисление критерия Фишера $F = \frac{s_{ад}^2}{s_Y^2}$;
- с) сравнение F и $F(0,05; fад; fi)$: адекватность считается обоснованной,
- д) если $F \leq F(0,05; fад; fi)$; если $F > F(0,05; 4; 16)$, следует уточнить измерения.

10. Расчет по полученной формуле $Y = a_0 V^{a_1} S^{a_2} t^{a_3}$ зависимости Y от V , S , t и публикация результатов.

Постоянные коэффициенты и показатели степеней для исследованных условий шлифования сталей 12ХН3А и 7ХГ2ВМ приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры обрабатываемого и инструментального материалов

Обрабатываемый материал	Характеристика шлифовального круга	R_a , мкм			
		C_{Ra}	x_1	x_2	x_3
12ХН3А	24А16	0,514	0,213	0,342	0,204
	24А25	0,617	0,237	0,523	0,175
	Л0Л10	0,525	0,157	0,198	0,202
	Л0Л25	0,458	0,133	0,240	0,126
7ХГ2ВМ	24А16	0,539	0,114	0,239	0,299
	24А25	1,267	0,163	0,442	0,312
	Л0Л10	0,893	0,174	0,236	0,290
	Л0Л25	0,801	0,188	0,238	0,299

В таблице 3 приведены максимальные и минимальные значения шероховатости, полученные в исследованном диапазоне режимов резания абразивными и эльборовыми кругами.

Таблица 3. Зависимость шероховатости от режимов шлифования

Обрабатываемый материал	Характеристика шлифовального круга	Режимы шлифования			R_a , мкм	
		V , м/с	S , мм/ход	t , мм	max	min
12ХН3А	24А16	0,083	0,5	0,002	-	0,067
		0,333	3	0,010	0,232	-
	24А25	0,083	0,5	0,002	-	0,080
		0,333	3	0,010	0,376	-
	Л0Л10	0,033	0,2	0,005	-	0,077
		0,133	1	0,015	0,164	-
	Л0Л25	0,033	0,2	0,005	-	0,101
		0,133	1	0,015	0,20	-
7ХГ2ВМ	24А16	0,083	0,5	0,002	-	0,085
		0,333	3	0,010	0,248	-
	24А25	0,083	0,5	0,002	-	0,089
		0,333	3	0,010	0,410	-
	Л0Л10	0,033	0,2	0,005	-	0,073
		0,133	1	0,015	0,187	-
	Л0Л25	0,033	0,2	0,005	-	0,085
		0,133	1	0,015	0,208	-

Заключение. Проведенное исследование экспериментально подтвердило, что характеристики шлифовальных кругов и режим резания оказывают существенное влияние на величину шероховатости обработанной поверхности. В исследованном диапазоне режимов резания величина шероховатости по параметру R_a изменяется в 2,0...4,6 раза в зависимости от условий шлифования. Можно отметить, что наибольшее влияние на величину шероховатости шлифованной поверхности оказывает глубина резания при использовании мелкозернистых кругов (как электрокорундовых, так и эльборовых) и поперечная подача при работе более крупнозернистыми кругами.

Увеличение глубины резания и продольной подачи предопределяет повышение удельной работы каждого зерна, увеличение съема металла в единицу времени, возрастание сил резания и упругих деформаций технологической системы станка, вследствие чего ухудшается класс шероховатости обработанной поверхности.

Величина продольной подачи также оказывает влияние на величину шероховатости. Повышение продольной подачи при неизменных глубине резания и поперечной подаче приводит к увеличению объема снимаемого металла, повышению толщины снимаемого одним зерном слоя и, как следствие, к увеличению шероховатости.

Список источников

1. Гулюшев Д.Ю. Исследование влияния режимов шлифования на качество поверхности. / Д.Ю. Гулюшев, Т.В. Рябкина, О.Н. Старостин // Социально-экономические и технические проблемы оборонно-промышленного комплекса России: история, реальность, инновации: Межвузовский сборник статей по материалам VII Всероссийской научно-практической конференции. – Нижний Новгород, НГТУ, 2021. – С. 169-174. – EDN CFDEZ.
2. Кременецкий Л.Л. Шероховатость поверхности и сила резания при шлифовании титанового сплава кругами различной твердости / Л.Л. Кременецкий, Н.Д. Сердюков // Современные наукоемкие технологии, 2023. – № 8. – С. 39-44. – DOI: 10.17513/snt.39728.
3. ГОСТ 25142-73. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – Введ. 1982. – М.: Изд-во стандартов, 1982.
4. ГОСТ 2.309-73. Обозначения шероховатости поверхностей. – Введ. 1973. – М.: Изд-во стандартов, 1973.
5. Яшков В.А. Обеспечение качества поверхности при внутреннем шлифовании / В.А. Яшков, Л.В. Силин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение, 2011. – С. 62-71.

6. Ломова О.С. Управление процессом формообразования на круглошлифовальных станках для обеспечения требуемой точности обработки: Дисс. ... д.т.н. по спец. 05.02.07 / Ломова Ольга Станиславовна, Омский государственный технический университет, 2013. 367 с.
7. Аверков К.В. Повышение качества обработанной поверхности при шлифовании жаропрочных сплавов на никелевой основе / К.В. Аверков, Д.С. Реченко // Омский научный вестник, 2011. – С. 36-39.
8. ГОСТ 28187-89. Отклонения формы и расположения поверхностей. – Введ. 1990. – М.: Изд-во стандартов, 1990.
9. Херцог М.Ф. Статистика и планирование эксперимента / М.Х. Херцог, Г. Френсис, А. Кларк. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 174 с.
10. Шумячер В.М. Шлифование. Теория и практика: монография / В.М. Шумячер, С.А. Крюков, Н.В. Байдакова // Волжский: ВПИ ВолгГТУ, 2019. – Т. 1. – 233 с. – EDN XZZQHS.
11. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. Введ. 1973. – М.: Изд-во стандартов, 1973.
12. Падве В.А. Элементы теории вероятностей и математической статистики / В.А. Падве. – Новосибирск: СГГА, 2013. – 209 с.
13. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Введ. 2002. – М.: Изд-во стандартов, 2002.

Каширская Елизавета Натановна. К.т.н., доцент, заместитель заведующего кафедрой промышленной информатики МИРЭА – Российского технологического университета. Основные направления исследований связаны с автоматизацией технологических процессов и производств в промышленности. AuthorID: 493904, SPIN: 3570-7148, ORCID: 0000-0001-5870-3786, Liza.kashirskaya@gmail.com, 119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78.

UDC 621.9:519.242

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.007

Planning and processing of experimental results during grinding

Elizaveta N. Kashirskaya

MIREA – Russian technological university,
Russia, Moscow, liza.kashirskaya@gmail.com

Abstract. The quality of the surface of a part formed by the technological process of cutting is assessed by geometric and physical-mechanical parameters. Grinding is used as the final processing operation, in connection with which the accuracy of the obtained surface acquires the greatest importance. The concept of accuracy includes three components: deviation of the shape and location of the surface, waviness and roughness. The article presents the results of a study of the influence of grinding modes on one of the indicators of cutting accuracy – the roughness of the ground surface.

Keywords: grinding, cutting conditions, feed, feed rate, cutting depth, experimental design, statistical processing

References

1. Gulyushev D.Yu., Ryabikina T.V., Starostin O.N. Issledovaniye vliyaniya rezhimov shlifovaniya na kachestvo poverkhnosti [Study of the influence of grinding modes on surface quality]. Sotsial'no-ekonomicheskiye i tekhnicheskiye problemy oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii: istoriya, real'nost', innovatsii: Mezhhvuzovskiy sbornik statey po materialam VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Nizhniy Novgorod, NGTU [Socio-economic and technical problems of the defense-industrial complex of Russia: history, reality, innovation: Interuniversity collection of articles based on the materials of the VII All-Russian scientific and practical conference. – Nizhny Novgorod, NSTU], 2021, pp. 169-174, EDN CFDSEZ.
2. Kremenetskiy L.L., Serdyukov N.D. Sherokhovatost' poverkhnosti i sila rezaniya pri shlifovanii titanovogo splava krugami razlichnoy tverdosti [Surface roughness and cutting force at grinding titanium alloy by wheels with different hardness grade]. Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii [Modern science-intensive technologies], 2023, no. 8, pp. 39-44, DOI: 10.17513/snt.39728.
3. GOST 25142-73. Sherokhovatost' poverkhnosti. Terminy i opredeleniya, Vved. 1982 [GOST 25142-73. Surface roughness. Terms and definitions, Introduced, 1982]. M.: Izd-vo standartov [M.: Publishing house of standards], 1982.

4. GOST 2.309-73. Oboznacheniya sherokhovatosti poverkhnostey, Vved. 1973 [GOST 2.309-73. Surface roughness designations, Introduced 1973]. M.: Izd-vo standartov [M.: Publishing house of standards], 1973.
5. Yashkov V.A., Silin L.V. Obespecheniye kachestva poverkhnosti pri vnutrennem shlifovanii [Ensuring surface quality during internal grinding]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, Mashinostroyeniye, materialovedeniye [Bulletin of Perm national research polytechnic university, Mechanical engineering, materials science], 2011, pp. 62-71.
6. Lomova O.S. Upravleniye protsessom formoobrazovaniya na krugloshlifoval'nykh stankakh dlya obespecheniya trebuyemoy tochnosti obrabotki: Diss. ... d.t.n. po spets. 05.02.07 [Control of the shaping process on cylindrical grinding machines to ensure the required processing accuracy: Diss. ... Doctor of Technical Sciences in specialty. 05.02.07], 2013, 367 p.
7. Averkov K.V., Rechenko D.S. Povysheniye kachestva obrabotannoy poverkhnosti pri shlifovanii zharoprochnykh splavov na nikel'voy osnove [Improving the quality of the processed surface when grinding heat-resistant nickel-based alloys]. Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk scientific bulletin], 2011, pp. 36-39.
8. GOST 28187-89. Otkloneniya formy i raspolozheniya poverkhnostey, Vved. 1990 [GOST 28187-89. Deviations in shape and location of surfaces, Introduced 1990]. M.: Izd-vo standartov [M.: Publishing house of standards], 1990.
9. Herzog M.F., Francis G., Clark A. Statistika i planirovaniye eksperimenta [Statistics and experimental design]. M.: DMK Press [Moscow: DMK Press], 2023, 174 p.
10. Shumyacher V.M., Kryukov S.A., Baidakova N.V. Shlifovaniye. Teoriya i praktika: monografiya [Grinding. Theory and practice: monograph]. Volzhskiy: VPI VolgGTU [Volzhsky: VPI VolGTU], 2019, vol. 1, 233 p., EDN XZZQHS.
11. GOST 2789-73. Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry, kharakteristiki i oboznacheniya, Vved. 1973. [GOST 2789-73. Surface roughness. Parameters, characteristics and designations, Introduced 1973]. M.: Izd-vo standartov [M.: Publishing house of standards], 1973.
12. Padve V.A. Elementy teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki [Elements of probability theory and mathematical statistics]. Novosibirsk: SGGA [Novosibirsk: SGGA], 2013, 209 p.
13. GOST R ISO 5725-2-2002. Tochnost' (pravil'nost' i pretsizionnost') metodov i rezul'tatov izmereniy. Vved. 2002 [GOST R ISO 5725-2-2002. Accuracy (correctness and precision) of measurement methods and results. Introduced 2002]. M.: Izd-vo standartov [M.: Publishing house of standards], 2002.

Kashirskaya Elizaveta Natanovna. Ph.D, associate professor, deputy head of the department of industrial informatics at MIREA - Russian technological university. The main directions of research are related to the study of wear of metal-cutting tools. AuthorID: 493904, SPIN: 3570-7148, ORCID: 0000-0001-5870-3786, Liza.kashirskaya@gmail.com, 119454, Russia, Moscow, 78, Vernadskogo Avenue.

Статья поступила в редакцию 14.02.2025; одобрена после рецензирования 24.04.2025; принята к публикации 29.04.2025.

The article was submitted 02/14/2025; approved after reviewing 04/24/2025; accepted for publication 04/29/2025.

Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике

УДК 66.092-977

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.008

Валидация CFD-модели реактора пиролиза с использованием данных термогравиметрического анализа и масс-спектрометрии

Баденко Владислав Вадимович, Козлов Александр Николаевич,
Пензик Максим Владиславович

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

Аннотация. В работе представлена CFD-модель слоевого реактора пиролиза биомассы. Входными данными для модели являются кинетические коэффициенты, полученные оригинальным численным методом на основе математической обработки термогравиметрических и масс-спектрометрических кривых пиролиза биомассы. Проведена валидация модели на основании экспериментальных результатов. Приведено описание используемой кинетической модели, механизмов тепло- и массопереноса. Разработанная модель характеризуется коэффициентами детерминации 0.82-0.85 по отношению к экспериментальным данным, и показывает наилучшую сходимость при температурной программе, нацеленной на выдержку при 480°C. Разработанная модель может применяться при масштабировании реакторов пиролиза.

Ключевые слова: CFD-моделирование, пиролиз, кинетика, биомасса

Цитирование: 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. – № 2 (38). – С. 90-102. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.008.

Введение. В связи с мировыми тенденциями интенсификации исследований эффективного использования углеродсодержащего сырья в рамках четвертого энергетического перехода [1], большой интерес привлекают технологии термохимической конверсии альтернативных энергоносителей, таких, как биомасса [2]. Под биомассой подразумеваются отходы лесопромышленного и агропромышленного комплексов, а также твердые коммунальные отходы. Такое сырье может быть преобразовано в полезные горючие газы, жидкости и твердое топливо с помощью термохимической конверсии. Термохимическая конверсия – это способ преобразования биоресурсов в энергоемкое топливо путем пиролиза, сжижения и газификации. Вследствие этого основным объектом исследований становятся опытные установки различных размеров по газификации и пиролизу [3].

Одним из целевых продуктов пиролиза является синтез-газ (или генераторный газ), основными горючими компонентами которого являются водород, монооксид и диоксид углерода, метан и другие углеводороды. Такой газ может применяться, как горючее топливо или как сырье в химической промышленности. Также при проведении пиролиза наблюдается большой выход твердых продуктов. При пиролизе лигноцеллюлозной биомассы твердый продукт принято называть биоуглем [4]. Такой биоуголь может применяться в качестве топлива. Эффективность получаемого продукта сильно зависит от наличия нежелательных примесей, например, смолы.

В целях повышения эффективности эксплуатации установок по пиролизу твердого топлива активно исследуются процессы, протекающие внутри опытных установок. Эти знания являются основой для контроля и оптимизации производственных процессов, а также для разработки устойчивых методов производства энергии и топлив. Поэтому, наряду с экспериментом, математические модели являются важными инструментами для описания

пиролиза. С помощью этого инструмента можно оценить влияние нескольких параметров на выход целевого продукта или вносить изменения в разрабатываемые установки.

Выбор математической модели для расчета процесса пиролиза определяется целями исследования. Чем выше комплексность модели, тем больше она подходит для поиска оптимальной организации процесса. Существуют различные виды численного и нечислового моделирования, от самых простых, таких, как нульмерное моделирование, до наиболее сложных, трехмерных. Модели, наиболее часто описываемые в научной литературе, включают моделирование термодинамического равновесия, кинетическое моделирование, моделирование вычислительной гидродинамики (CFD – computational fluid dynamics) [5]. Математическое описание процесса пиролиза биомассы обычно основано на законах тепло- и массопереноса, законах энергии и принципе сохранения импульса.

Результаты моделирования, полученные в ходе исследования, дают информацию для понимания физико-химических процессов, происходящих в реакторе, что облегчает проектирование, строительство и оптимизацию оборудования для пиролиза в будущем.

Кинетические данные пиролиза биомассы часто получают с помощью термогравиметрического анализа (ТГА), совмещенного с масс-спектрометрией, поскольку образец можно исследовать при различных условиях конверсии (давление, размер частиц, скорость нагрева, концентрация газа-реагента, температура) [6]. Данные термогравиметрических и масс-спектрометрических исследований могут быть использованы, как входные данные для моделирования.

Основной целью этого исследования является применение численных методов и математического моделирования для описания ректора пиролиза биомассы. Используемый подход верифицируется на основании сравнения расчетных данных и экспериментального исследования и позволяет сделать выводы по оптимизации процесса.

2. Материалы и методы.

2.1. Описание исследуемого топлива. Исследование проводилось на образцах лигноцеллюлозной биомассы – древесной щепы (сосна), с примерным размером частицы в 30 мм x 10 мм x 10 мм.

Технические характеристики и данные элементного анализа образца щепы приведены в таблице 1. Характеристики исходной древесины определялись с помощью стандартных аналитических методов – ASTM E871, D1102 - 84 (2013), E872 и сопоставимы с данными, полученными другими исследователями [7]. Данные о содержании С и Н в образцах получены с помощью элементного анализатора ThermoFinnigan Flash EA 1112 (Италия).

Теплотворная способность (Q , мДж/кг) была рассчитана по данным элементного анализа в соответствии с уравнением Чаннивалы [8] (1), где С, Н, S, О, N, А – содержание химических элементов и золы в топливе, %.

$$Q = 0.3491C + 1.1783H + 0.1005S - 0.1034O - 0.0151N - 0.0211A \quad (1)$$

Таблица 1. Физико-химические характеристики исследуемой биомассы

Технический анализ, %	
Выход летучих	86.80
Доля углерода в нелетучем остатке	13.03
Зольность	0.17
Элементный анализ, %	
С	46.60
Н	6.32
О	47.08
Q (МДж/кг)	18.84

2.2. Термогравиметрическое исследование. Для математического моделирования и численных методик помимо проведения непосредственно эксперимента необходимо термогравиметрическое и масс-спектрометрическое исследование исходной биомассы. Эти данные необходимы для анализа поведения образца в условиях термического воздействия и описания кинетики.

Было проведено термогравиметрическое исследование, совмещенное с масс-спектрометрией при различных скоростях нагрева на приборе термического анализа STA 449 F1 Jupiter. Результаты термогравиметрического исследования приведены на рисунках 1 и 2. Рисунок 2 носит демонстрационный характер, так как в расчетах участвовали кривые масс-спектров для четырёх скоростей нагрева и в каждом случае анализировались кривые для каждого массового числа.

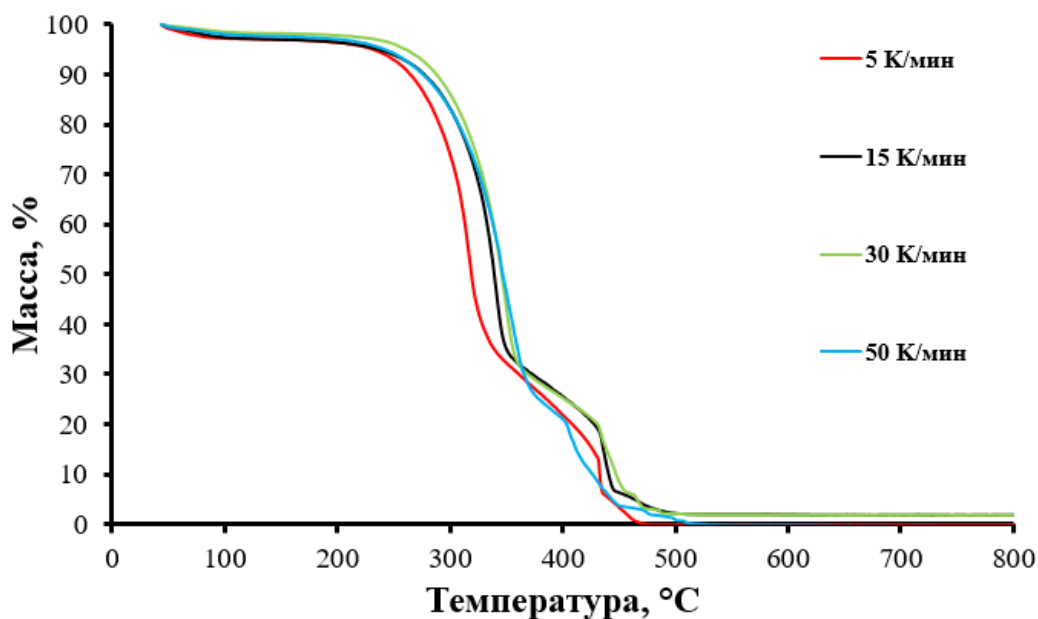


Рис.1. Данные термогравиметрического исследования образцов биомассы

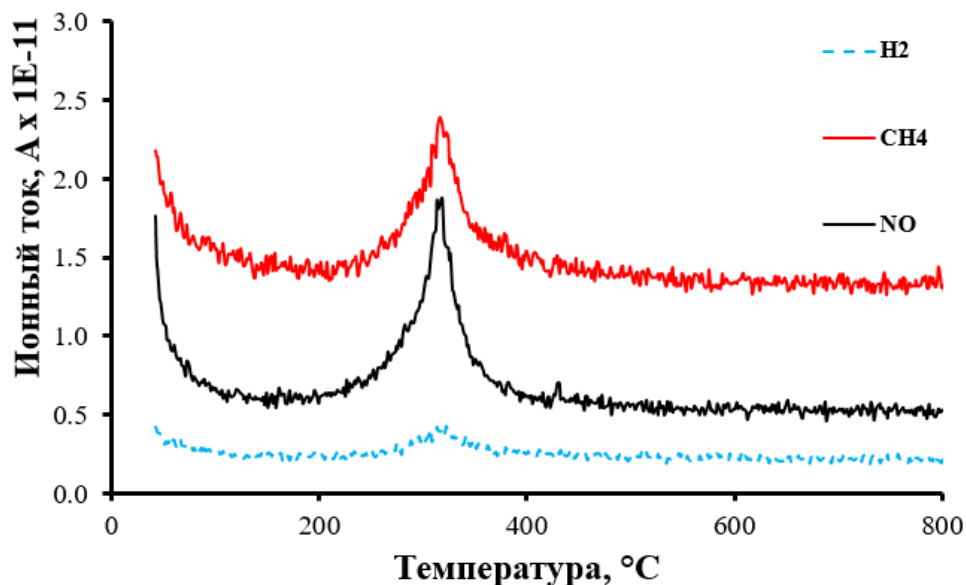


Рис.2. Данные масс-спектрометрии при термогравиметрическом исследовании образцов биомассы

Полученные данные были использованы для кинетического анализа, приведенного в п.2.5.

2.3. Экспериментальное исследование биомассы в условиях пиролиза. Было проведено экспериментальное исследование биомассы на лабораторной установке – слоевом реакторе пиролиза. В состав реактора входит решетка, электронагреватели, изоляционная рубашка и термопары в качестве аналитического элемента. Форма реактора – цилиндрическая. Габариты реактора – 31 см в высоту, внутренний диаметр – 15 см, промежуток от дна реактора до решетки – 5 см. На рисунке 3 приведена принципиальная схема реакторной зоны установки. В электронагревателях используется нихромовая проволока и керамические изоляторы. Управление нагревом производится при помощи термоконтроллера и регулятора напряжения. Изоляционная рубашка выполнена из стеклокерамических волокон. Выходная труба для газообразных продуктов не снабжена изоляцией – это необходимо для конденсации некоторых продуктов и их возвращения в реакционную зону для крекинга. Всего в установке четыре термопары, две из них расположены в слое (T1, T1'), одна над слоем (T2) и одна возле отверстия для забора газа (T3). Также установка оборудована дифференциальным манометром для измерения давления.

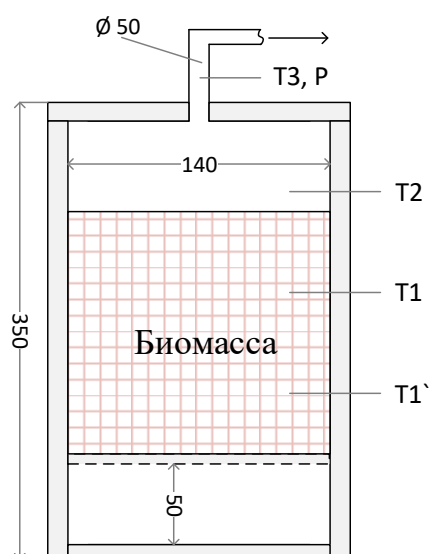


Рис.3. Принципиальная схема слоевого реактора пиролиза

Время окончания эксперимента определяется по отсутствию изменений в показаниях газового счетчика и снижению избыточного давления до значения, недостаточного для продвижения получаемого газа из реактора в газовый хроматограф. Температурная программа эксперимента состоит из двух шагов – постепенное нагревание при скорости нагрева 10° C/мин и выдерживание при определенной температуре. Данные о результатах эксперимента приведены в таблице 2. Теплотворная способность была рассчитана согласно (1).

Таблица 2. Экспериментальные данные пиролиза древесной биомассы

Входные данные	Температура, °C	480
	Масса навески, кг	0,465
Выходные данные	H ₂ , %	9,56
	CO, %	30,71
	CH ₄ , %	21,69
	CO ₂ , %	37,24
	Q, МДж/кг	12,69
	Выход твердого остатка, %	30,0
	Выход жидких продуктов, %	29,9
	Выход газа, %	17,6

Анализ компонентного состава полученного газа определялся с помощью газового хроматографа INFICON Micro GC Fusion, работающего в онлайн режиме. Отбор проб проводился каждые 3 минуты. Максимальные показатели теплотворной способности на экспериментальной установке достигались при температуре 480°C, поэтому для моделирования используются именно эти данные. Идентификация ионов, испускаемых квадрупольным масс-спектрометром, является классификационной задачей и заключается в сопоставлении отношения заряда к массе со стандартизированными библиотеками. Применение такого подхода возможно благодаря воспроизводимости таких спектров. Таким образом, сигналы ионных токов для анализируемых соотношений m/z были соотнесены как: 2 m/z – H_2 , 15 m/z – CH_4 , 18 m/z – H_2O , 30 m/z – NO , 44 m/z – CO_2 .

2.4. Описание расчетной сетки. Результаты анализа исходной биомассы, термогравиметрического (совмещенного с масс-спектрометрией) исследования и экспериментов на опытной установке были использованы в качестве входных данных для математической модели. Математическая модель представляет собой задачу вычислительной гидродинамики и решается в рамках заданной расчетной сетки. Создание расчетной сетки – процесс разбиения геометрической модели опытной установки на малые участки. В этих участках создается конечное число точек, именуемых узлами, в рамках которых решается комплекс заданных уравнений. Чем выше плотность узлов в сетке, тем выше точность получаемого результата. Однако, высокая точность неизбежно приводит к увеличению расчетного времени. Поэтому расчетная сетка должна быть сбалансирована относительно точности и времени расчета.

Используемая в работе сетка состоит из 201055 узлов и 851878 элементов. Общий объем сетки составил 0,0093 м³.

Для стенок реактора пиролиза была задана величина грани элемента сетки в 0,008 м. Такой подход связан с тем, что для металлических конструкций в реакторе детальное моделирование не требуется. Колосниковая решетка реализована, как пластина с отверстиями, осуществляющими подвод газа к засыпке. Для засыпки реализована более подробная сетка, с размером грани в 0,0003 м. На рисунке 4 представлен вид расчетной сетки.

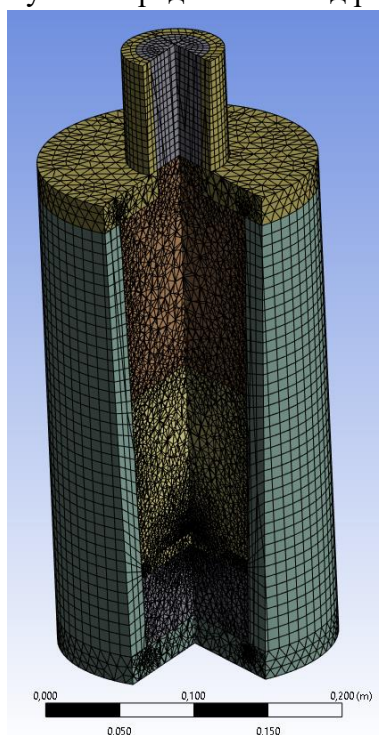


Рис. 4. Вид расчетной сетки

2.5. Описание кинетической модели. Входными данными для математического моделирования являются результаты расчетов, полученных с помощью оригинального численного метода, описанного в предыдущей работе [9,10]. Оригинальность метода заключается в корреляции данных термического анализа и масс-спектрометрии при расчетах кинетических параметров реакций выделения газообразных продуктов конверсии. Метод предполагает учет нелинейных эффектов и более комплексную оценку кинетики процесса.

Ввиду высокой сложности изучаемых процессов термохимической конверсии, при моделировании применяются различные аппроксимации. Исползованный метод содержит несколько приближений, влияющих напрямую на кинетические коэффициенты. Так, предполагается первый порядок реакции образования целевого газообразного продукта. Также, вычисляемая энергия активации представляет собой эффективную или кажущуюся энергию активации, так как исследуется укрупненный механизм кинетических реакций. При математическом моделировании также применяется допущение о первом порядке реакции, так как в условиях реального процесса невозможно отделить различные реакции и отделить их скорости. Результаты расчетов кинетических коэффициентов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Кинетические коэффициенты для модельных реакций образования газообразных компонентов

	H ₂	CH ₄	NO	CO ₂
E _a , кДж/моль	20.0	34.0	44.7	101.0
A, 1/с	3.10E-04	6.80E-05	2.40E-05	2.10E-06

Кинетические коэффициенты применяются в уравнении Аррениуса (2) для расчета константы скорости реакции:

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) f(\alpha) \quad (2)$$

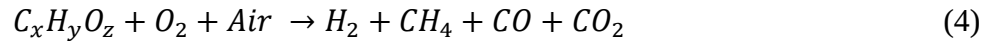
где $f(\alpha)$ – функция описания. Функция $f(\alpha)$ описывает порядок реакции и ее механизм и в качестве приближения может быть опущена или принята за константу. Размерность константы скорости реакции принята за 1/с, то есть соблюдается допущение о первом порядке реакции. Также, в моделировании часто вводится модификация уравнения Аррениуса, заключающаяся в дополнительном множителе T^θ . Степень в этом множителе в данной работе принимается как 1, однако, для более сложных моделей может иметь иные значения.

При расчете массовой доли для каждого компонента газовой смеси использовалась система уравнений (3) конвекции-диффузии на основе диссипативной модели [11,12]:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \vartheta_{i,r} M_i \xrightarrow{k_{f,r}} \sum_{i=1}^N \vartheta_{i,r} M_i \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i \\ \vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i - D_{i,T} \frac{\nabla T}{T} \\ R_{i,r} = \vartheta_{i,r} M_i C_1 C_2 \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j^N \vartheta_{j,r} M_j} \end{aligned} \quad (3)$$

где M – вещество, q – стехиометрический коэффициент, k – константа скорости, Y – концентрация, ρ – плотность (кг/м³), J – диффузионный поток (кг/м²·сек), D – коэффициент массовой диффузии (м²/с), C_1 и C_2 – константы турбулентной модели, μ – турбулентная вязкость (Па·с), Sc – число Шмидта (взято за 0.7), R_i – молярная скорость образования, ε – переменная перемешивания.

В моделировании была предложена обобщенная кинетическая реакция (4) для взаимодействия в газовой фазе, не учитывающая смолы, сажу и выделяющая только несколько газовых продуктов (соответствующих основным компонентам синтез-газа) в качестве приближения:



где *Air* обозначает имеющийся в реакторе на момент эксперимента воздух.

2.6. Описание модели тепло и газо-переноса. Энтальпия для участвующих в моделировании материалов описывается как [13]:

$$\begin{aligned} H &= h + \Delta H \\ h &= h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \\ E &= h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

где *href*, *Tref* – начальные значения энтальпии и температуры, *cp* – удельная теплоемкость при постоянном давлении (Дж/кг·°C), *E* – тепловая энергия (Дж).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k^c \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (6)$$

где *k^c* – теплопроводность (Вт/м·°K), *J* – диффузионный поток для компонента *j* в смеси газов, *v* – скорость (м/с), *Sh* – тепло от химических реакций и внешних источников (Дж), *p* – давление (Па), *ρ* – плотность.

Общее описание скоростей базируется на уравнении неразрывности и уравнениях Навье-Стокса [14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \\ v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - \nu \Delta v_x + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \\ v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} - \nu \Delta v_y + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

где *ρ* – плотность жидкости, *ν* – коэффициент кинематической вязкости, *p* – гидродинамическое давление, *v_x* и *v_y* – продольная и поперечная компоненты вектора скорости.

Слой древесной щепы предполагается, как пористая среда, через которую проходит поток газа. В работе используется описание среды со следующими предположениями: размер частиц однороден, пористость изотропна во всей засыпке, твердая и газовая фазы в одной ячейке находятся в тепловом равновесии, газовая смесь состоит из воздуха и подчиняется закону идеального газа. Для моделирования стационарного течения жидкости внутри пористого слоя используется модель турбулентности переноса напряжения сдвига Ментера (Menter's Shear Stress Transport) [15], состоящая из двух уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} &= P - \beta \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} &= \frac{\gamma}{v_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F) \frac{\partial \rho \sigma}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (8)$$

где *σ*, *β* – корректировочные константы, *P* и *F* – функции, *u* – вихревая вязкость.

Использование *SST* связано с тем, что она использует модели *k-w* и *k-ε* в зависимости от геометрически заданных условий, переключаясь между моделированием свободного потока и пограничными слоями и применяя соответствующее уравнение.

3. Результаты и обсуждение. Использование математических моделей предполагает их валидацию на физическом эксперименте. На рисунке 5 представлено сравнение

моделируемых профилей температуры в точках, аналогичных расположению термопар в реакторе – в слое биомассы, над слоем и в выходном газоходе. В экспериментальной установке в слое установлено две термопары, для моделирования их сигналы были усреднены в качестве приближения, так как более детальное моделирование слоя биомассы требует значительного усложнения модели и предполагается в будущих исследованиях. В силу того, что при моделировании были использованы аппроксимации, расчетные и экспериментальные кривые не совпадают полностью, вследствие чего требуется статистическая оценка.

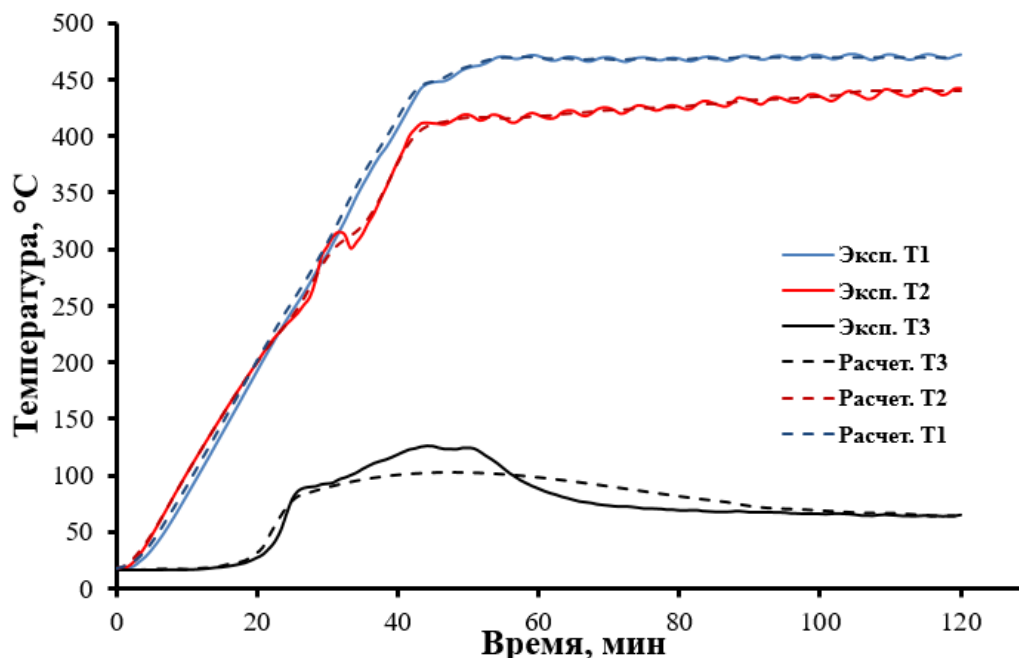


Рис. 5. Результаты моделирования температуры в реакторе и экспериментальные значения

Сравнение расчетных и экспериментальных данных было проведено с использованием критерия Фишера, выраженного в сравнении двух дисперсий:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

$$F = \frac{S_a^2}{S_b^2} \quad a > b \quad (9)$$

где S^2 – дисперсия выборки, n – объем выборки, F – критерий Фишера. Рассчитанный критерий сравнивался с табличным значением для степени свободы $k=n-1=145$ и степени значимости 0,05.

Результат статистической обработки для трех пар кривых приведен в таблице 3.

Таблица 3. Результат расчета критерия Фишера и коэффициента достоверности для расчетных термограмм.

Термопара/расчетная кривая	T ₁	T ₂	T ₃
Рассчитанный критерий F	1.001	1.003	1.246
Табличный критерий F	1.21		
Коэффициент достоверности аппроксимации	0.999	0.999	0.885

Из таблицы следует, что температурное моделирование можно считать корректным для слоя биомассы и газовой фазы над слоем. Распределение температуры на выходе из реактора не совпадает с экспериментальным. Это обусловлено влиянием смолы, опускаемой в моделировании в качестве приближения, и другими неучтенными эффектами. Такое расхождение можно охарактеризовать как систематическую погрешность. В связи с этим, в

температурную программу вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие этот эффект с привязкой по времени. Таким образом, вводится дополнительное нагревание на 10°C в интервале 28-60 минут после начала эксперимента.

На основании комплексной модели и кинетических коэффициентов были получены расчетные зависимости концентрации от времени, представленные на рисунках 6 и 7 в сравнении с нормализованными концентрациями из эксперимента.

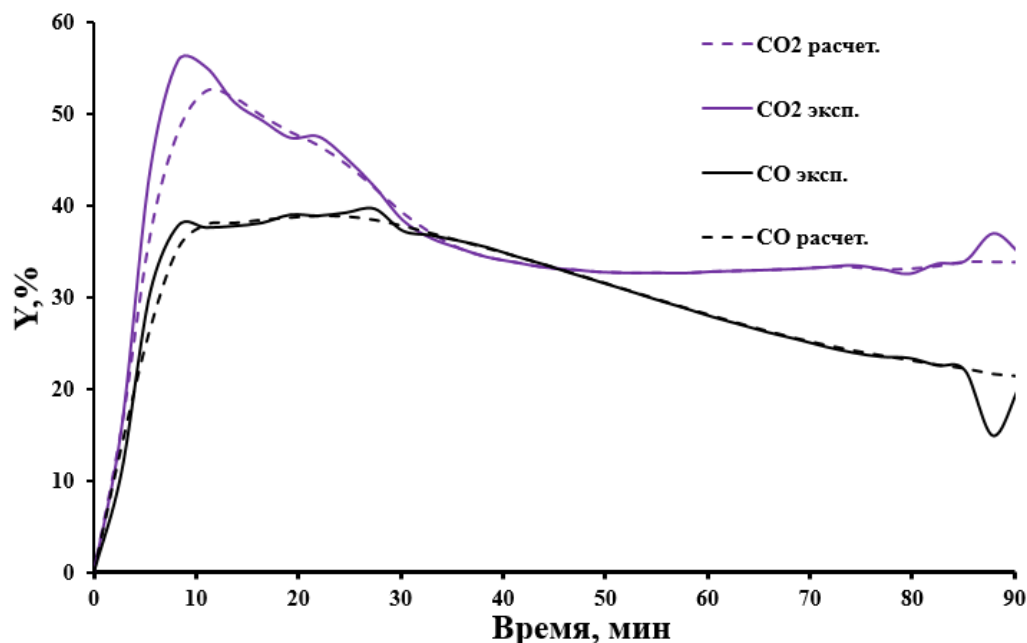


Рис. 6. Сопоставление результатов моделирования и экспериментальных значений по образованию CO и CO₂ при пиролизе биомассы

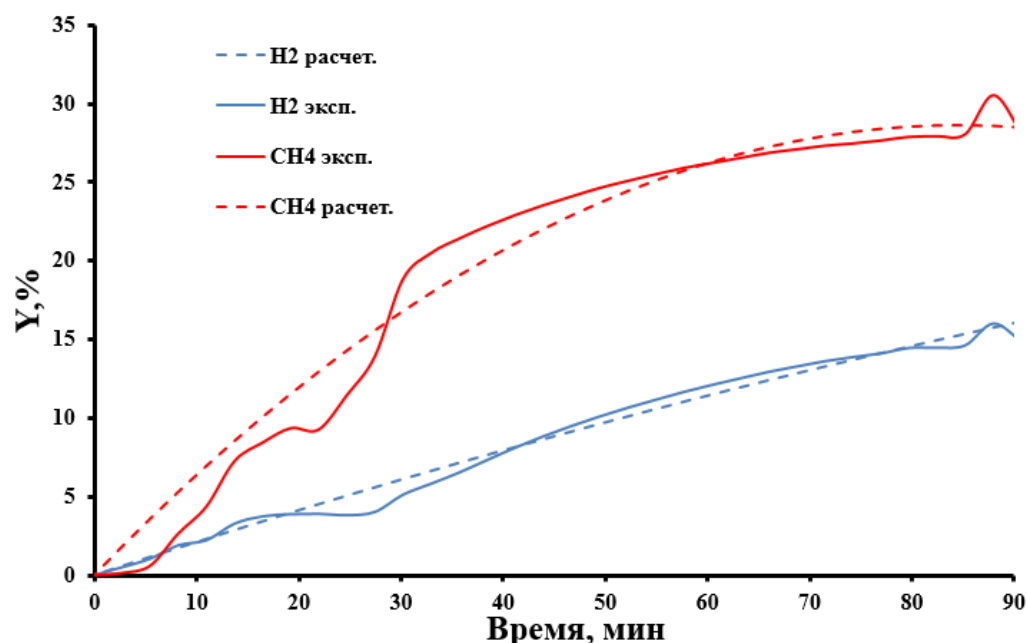


Рис.7. Сопоставление результатов моделирования и экспериментальных значений по образованию H₂ и CH₄ при пиролизе биомассы

Расчетные кривые за счет принятых допущений и упрощенного кинетического механизма очень гладкие. Модельные кривые обладают коэффициентами детерминации в диапазоне 0.82-0.85, однако, этого достаточно для использования в прогнозировании. В

литературных источниках состав получаемого в ходе пиролиза газа варьируется в зависимости от сырья, конструкции реакторной зоны и температурных программ. Полученные данные сопоставимы как с экспериментальными данными [16-18], так и с различными CFD-моделями [19].

Заключение. На основе оригинального численного метода для получения входных данных, экспериментальных данных и CFD-моделирования были получены температурные профили и зависимости концентраций компонентов синтез-газа. Валидация модели была проведена с помощью статистического критерия Фишера и коэффициента достоверности аппроксимации. Разработанная модель характеризуется коэффициентами детерминации 0.82-0.85 по отношению к экспериментальным данным, однако, показывает наилучшую сходимость только при температурной программе, нацеленной на выдержку при 480°C. Применение модели и численного метода в дальнейших исследованиях позволит подобрать режимы работы реактора пиролиза с целью получения условий, обеспечивающих максимальный выход биоугля и синтез-газа с максимальной теплотворной способностью при минимальном образовании смолы, а также для масштабирования опытных установок пиролиза.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0005) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур».

Список источников

1. Amoah A., Amoah B., Kwablah E. et al. Renewable energy transition and climate finance nexus in sub-Saharan Africa. *Global environmental change advances*, 2025, vol. 4, DOI: 10.1016/j.gecadv.2025.100013.
2. Adeleke A., Ikubanni P., Orhadahwe T. et al. Sustainability of multifaceted usage of biomass: a review. *Heliyon*, 2021, vol. 7, iss. 9, DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e08025.
3. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина // ИНЭИ РАН–Московская школа управления СКОЛКОВО. – Москва, 2019. – 210 с.
4. Ebrahimi M., Gholipour S., Mostafaei G. et al. Biochar-amended food waste compost: A review of properties. *Results in engineering*, 2024, vol. 24, DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103118
5. Bournet P., Rojano F. Advances of Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in agricultural building modelling: research, applications and challenges. *Computers and electronics in agriculture*, 2022, vol. 201, DOI: 10.1016/j.compag.2022.107277.
6. Moyo D., Mapossa A., Rademeyer M. et al. TGA investigation of the volatilisation of fipronil at elevated temperatures. *Thermochimica acta*, 2022, vol. 718, DOI: 10.1016/j.tca.2022.179379.
7. Sun Z., Xu B., Rony A.H. et al. Thermogravimetric and kinetics investigation of pine wood pyrolysis catalyzed with alkali-treated CaO/ZSM-5. *Energy conversion and management*, 2017, vol. 146, 182-194, DOI: 10.1016/j.enconman.2017.04.104.
8. Channiwala S.A., Parikh P.P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 2002, vol. 81, iss. 8, pp. 1051-1063, DOI: 10.1016/S0016-2361(01)00131-4.
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, Bioprod. Bioref.*, 2024, vol. 18, iss. 5, pp. 1254-1266, DOI: 10.1002/bbb.2616.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611908 / В.В. Баденко, А.Н. Козлов, И.К. Сосновский. – Заявка № 2024610731. Дата поступления 16 января 2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25 января 2025 г.
11. Goris Q., Bampouli A., Hussain M. et al. A new strategy for modelling sonochemical reactors: Coupling of the non-linear Louisnard model with mass and heat transport equations with applications to cavitating viscous fluids. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2025, vol. 112, DOI: 10.1016/j.ultsonch.2024.107114.
12. Fathi M., Roekaerts D., Hickel S. Numerical simulation of transcritical multiphase combustion using real-fluid thermochemical and transport properties. *Combustion and flame*, 2025, vol. 275, DOI: 10.1016/j.combustflame.2025.114055.
13. Modi N., Wang X., Kumar V. et al. Impact of key parameters on the numerical modelling of Phase-Changing phenomena in horizontal latent heat thermal energy storage. *Applied thermal engineering*, vol. 257, part C, 2024, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124419.

14. Сумбатян М.А. Итерационный метод для уравнений Навье-Стокса в задаче обтекания тонкой пластинки потоком вязкой несжимаемой жидкости / М.А. Сумбатян, Я.А. Бердник, А.А. Бондарчук // Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех., 2020. – № 66. – 132-142. DOI: 10.17223/19988621/66/11.
15. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. Turbulence, heat and mass transfer, Begell House, Inc., 2003, vol. 4, pp. 625-632.
16. Chen T., Ku X., Li T. et al. High-temperature pyrolysis modeling of a thermally thick biomass particle based on an MD-derived tar cracking model. Chemical engineering journal, 2021, vol. 417, 127923, DOI: 10.1016/j.cej.2020.127923.
17. Matamba T., Tahmasebi A., Yu J. et al. A review on biomass as a substitute energy source: Polygeneration influence and hydrogen rich gas formation via pyrolysis. Journal of analytical and applied pyrolysis, 2023, vol. 175, 106221, DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106221.
18. Yang H., Cui Yu., Han T. et al. High-purity syngas production by cascaded catalytic reforming of biomass pyrolysis vapors. Applied Energy, 2022, vol. 322, DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119501.
19. Mlonka-Mędrala A., Evangelopoulos P., Sieradzka M. et al. Pyrolysis of agricultural waste biomass towards production of gas fuel and high-quality char: Experimental and numerical investigations. Fuel, 2021, vol. 296, 120611, DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120611.

Баденко Владислав Вадимович. Инженер-исследователь, аспирант отдела теплоэнергетических систем ИСЭМ СО РАН. Основные направления исследований - термохимическая конверсия биомассы, численное моделирование процессов горения и комбинированные энергетические установки для разложения биомассы. AuthorID: 1186521, SPIN: 5115-6229, ORCID: 0009-0007-0992-564X, badenko@isem.irk.ru, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова 130.

Козлов Александр Николаевич. Кандидат технических наук, заведующий лабораторией термодинамики, отдел теплоэнергетических систем ИСЭМ СО РАН. Основные направления исследований - сжигание гетерогенных твердых топлив (биомасса, уголь) и разработка инженерных методов расчета процесса газификации. AuthorID: 217821, SPIN: 5451-8611, ORCID: 0000-0002-5983-5884, kozlov@isem.irk.ru, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова 130.

Пензик Максим Владиславович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории термодинамики, отдел теплоэнергетических систем ИСЭМ СО РАН. AuthorID: 599819, SPIN: 9045-8057, ORCID: 0000-0002-3544-9866, penzik@isem.irk.ru, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова 130.

UDC 66.092-977

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.008

Validation of CFD model of pyrolysis reactor using thermogravimetric analysis and mass spectrometry data

Vladislav V. Badenko, Alexander N. Kozlov, Maxim V. Penzik

Melentiev energy systems institute SB RAS,

Russia, Irkutsk, badenko@isem.irk.ru

Abstract. The paper presents a CFD model of a bed reactor for biomass pyrolysis. The input data for the model are kinetic coefficients obtained by an original numerical method based on mathematical processing of thermogravimetric and mass spectrometric curves of biomass pyrolysis. Validation of the model on the basis of experimental results is carried out. The description of the used kinetic model, heat and mass transfer mechanisms is given. The developed model is characterized by coefficients of determination 0.82-0.85 with respect to the experimental data, and shows the best convergence at the temperature program aimed at exposure at 480°C. The developed model can be used for scaling of pyrolysis reactors.

Keywords: CFD modeling, pyrolysis, kinetics, biomass

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0005) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center.

References

1. Amoah A., Amoah B., Kwablah E. et al. Renewable energy transition and climate finance nexus in sub-Saharan Africa. *Global environmental change advances*, 2025, vol. 4, DOI: 10.1016/j.gecadv.2025.100013.
2. Adeleke A., Ikubanni P., Orhadahwe T. et al. Sustainability of multifaceted usage of biomass: a review. *Heliyon*, 2021, vol. 7, iss. 9, DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e08025.
3. Makarova A.A., Mitrova T.A., Kulagina B.A. Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii 2019 Forecast of energy development in the world and Russia 2019]. INEI RAN – Moskovskaya shkola upravleniya SKOLKOVO [INEI RAS, Moscow School of Management SKOLKOVO], Moscow, 2019, 210 p.
4. Ebrahimi M., Gholipour S., Mostafaei G. et al. Biochar-amended food waste compost: A review of properties. *Results in engineering*, 2024, vol. 24, DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103118.
5. Bournet P., Rojano F. Advances of Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in agricultural building modelling: research, applications and challenges. *Computers and electronics in agriculture*, 2022, vol. 201, DOI: 10.1016/j.compag.2022.107277.
6. Moyo D., Mapossa A., Rademeyer M. et al. TGA investigation of the volatilisation of fipronil at elevated temperatures. *Thermochimica acta*, 2022, vol. 718, DOI: 10.1016/j.tca.2022.179379.
7. Sun Z., Xu B., Rony A.H. et al. Thermogravimetric and kinetics investigation of pine wood pyrolysis catalyzed with alkali-treated CaO/ZSM-5. *Energy conversion and management*, 2017, vol. 146, 182-194, DOI: 10.1016/j.enconman.2017.04.104.
8. Channiwala S.A., Parikh P.P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 2002, vol. 81, iss. 8, pp. 1051-1063, DOI: 10.1016/S0016-2361(01)00131-4.
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, Bioprod. Bioref.*, 2024, vol. 18, iss. 5, pp. 1254-1266, DOI: 10.1002/bbb.2616.
10. Badenko V.V., Kozlov A.N., Sosnovsky I.K. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2024611908 [Certificate of state registration of computer program No. 2024611908]. [Zayavka no. 2024610731. Data postupleniya 16 yanvarya 2024 g. Zaregistrirovano v Reyestre programm dlya EVM 25 yanvarya 2025] Application No. 2024610731. Date of receipt January 16, 2024. Registered in the register of computer programs January 25, 2025.
11. Goris Q., Bampouli A., Hussain M. et al. A new strategy for modelling sonochemical reactors: Coupling of the non-linear Louissard model with mass and heat transport equations with applications to cavitating viscous fluids. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2025, vol. 112, DOI: 10.1016/j.ultsonch.2024.107114.
12. Fathi M., Roekaerts D., Hickel S. Numerical simulation of transcritical multiphase combustion using real-fluid thermochemical and transport properties. *Combustion and flame*, 2025, vol. 275, DOI: 10.1016/j.combustflame.2025.114055.
13. Modi N., Wang X., Kumar V. et al. Impact of key parameters on the numerical modelling of Phase-Changing phenomena in horizontal latent heat thermal energy storage. *Applied thermal engineering*, Vol. 257, Part C, 2024, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124419.
14. Sumbatyan M.A., Berdnik Ya.A., Bondarchuk A.A. Iteratsionnyy metod dlya uravneniy Nav'ye-Stoksa v zadache obtekaniya tonkoy plastinki potokom vyazkoy neszhimayemoy zhidkosti [An iterative method for the Navier-Stokes equations in the problem of a viscous incompressible fluid flow around a thin plate], *Vestn. Tomsk. Gos. Univ. Mat. Mekh.* [Bulletin of Tomsk state university. Mathematics and mechanics.], 2020, no. 66, pp. 132-142, DOI: 10.17223/19988621/66/11.
15. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Turbulence, heat and mass transfer*, Begell House, Inc., 2003, vol. 4, pp. 625-632.
16. Chen T., Ku X., Li T. et al. High-temperature pyrolysis modeling of a thermally thick biomass particle based on an MD-derived tar cracking model. *Chemical engineering journal*, 2021, vol. 417, 127923, DOI: 10.1016/j.cej.2020.127923.
17. Matamba T., Tahmasebi A., Yu J. et al. A review on biomass as a substitute energy source: Polygeneration influence and hydrogen rich gas formation via pyrolysis. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 2023, vol. 175, 106221, DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106221.
18. Yang H., Cui Yu., Han T. et al. High-purity syngas production by cascaded catalytic reforming of biomass pyrolysis vapors. *Applied Energy*, 2022, vol. 322, DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119501.
19. Mlonka-Mędrala A., Evangelopoulos P., Sieradzka M. et al. Pyrolysis of agricultural waste biomass towards production of gas fuel and high-quality char: Experimental and numerical investigations. *Fuel*, 2021, vol. 296, 120611, DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120611.

Badenko Vladislav Vadimovich. Research engineer, postgraduate student of the Heat and Power Systems Department of ISEM SB RAS. Main research areas - thermochemical conversion of biomass, numerical modelling of combustion processes and combined heat and power plants for biomass decomposition. AuthorID: 1186521, SPIN: 5115-6229, ORCID: 0009-0007-0992-564X, badenko@isem.irk.ru, 664033, Russia, Irkutsk, Lermontova St., 130.

Kozlov Alexander Nikolaevich. Senior researcher (PhD) at the Department of Thermal Power Systems at ESI SB RAS. His research interests focus on heterogeneous solid fuel (biomass, coal) combustion and the design of simple engineering techniques for the calculation of the gasification process. AuthorID: 217821, SPIN: 5451-8611, ORCID: 0000-0002-5983-5884, kozlov@isem.irk.ru. 664033, Russia, Irkutsk, Lermontova St., 130.

Penzik Maxim Vladislavovich. Senior researcher (PhD) at the Department of Thermal Power Systems at ESI SB RAS. AuthorID: 599819, SPIN: 9045-8057, ORCID: 0000-0002-3544-9866, penzik@isem.irk.ru, 664033, Russia, Irkutsk, Lermontova St., 130.

Статья поступила в редакцию 19.03.2025; одобрена после рецензирования 21.04.2025; принята к публикации 24.04.2025.

The article was submitted 03/19/2025; approved after reviewing 04/21/2025; accepted for publication 04/24/2025.

УДК 681.5.015.22: 621.565.83

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.009

Определение параметров тепловой модели элементов Пельтье

Безик Дмитрий Александрович, Бычкова Татьяна Викторовна

Брянский государственный аграрный университет,
Россия, Брянск, tanyabychkova@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы определения параметров тепловой модели элементов Пельтье, необходимых для его представления в расчетной модели метода конечных элементов. Показано, как, используя справочные данные элемента Пельтье, получить уравнение, аппроксимирующее его эффективную тепловую мощность. С использованием этого уравнения предложена методика определения эффективного коэффициента теплопроводности, объёмной и поверхностной плотности теплового потока элемента Пельтье. Эти параметры позволяют полностью описать элемент в конечно-элементной расчетной схеме. Полученные значения применены для расчета термостата на элементах Пельтье в российской САЕ-системе автоматизированного проектирования APM WinMachine.

Ключевые слова: моделирование, теплопередача, элемент Пельтье, метод конечных элементов, параметры модели, APM WinMachine

Цитирование: Безик Д.А. Определение параметров тепловой модели элементов Пельтье / Д.А. Безик, Т.В. Бычкова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2 (38). – С. 103-112. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.009.

Введение. Современное программное обеспечение позволяет проводить сложные численные расчеты и оптимизировать различные конструкции. В частности, с помощью отечественного пакета программ APM Winmachine, реализующего метод конечных элементов, можно проводить расчет температурных полей [1]. При этом необходимо задать тепловые свойства материалов (теплопроводность и теплоёмкость) и граничные условия (тепловые нагрузки – температуры элементов, поверхностный и объёмный потоки тепла). После этого можно найти стационарное распределение температур или решить задачу нестационарной теплопроводности.

В некоторых холодильных установках для охлаждения применяются полупроводниковые элементы Пельтье (термоэлектрические генераторы). Они представляют собой конструктивно завершённое устройство, состоящее из термопар, соединённых между собой электропроводящими пластинами, расположенных в прямоугольной форме, и помещённых между керамическими пластинами (рис. 1). В качестве материала термопар обычно используются полупроводники. При подаче напряжения на элемент Пельтье (ЭП) одна его сторона (грань) нагревается, а другая охлаждается. Использование термоэлектрических модулей в системах охлаждения имеет ряд достоинств – они не имеют движущихся частей, жидкостей и ими легко управлять. К недостаткам можно отнести невысокий КПД.

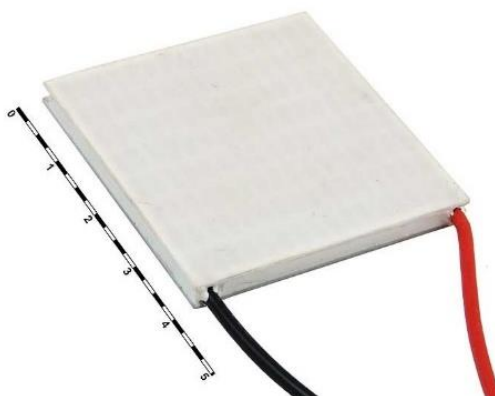


Рис. 1. Внешний вид элемента Пельтье

Для моделирования систем охлаждения в АРМ Winmachine с применением элементов Пельтье нужно задавать значение соответствующих тепловых нагрузок (поверхностные и объёмные тепловые потоки), однако в справочной документации эти параметры не приводятся [2, 3]. Также для тепловых расчетов необходимо знать коэффициент теплопроводности ЭП.

В процессе работы ЭП через него проходит тепловой поток и протекает электрический ток. Эти процессы взаимосвязаны. При протекании электрического тока по закону Джоуля-Ленца выделяется теплота, в контактах полупроводников разного типа проводимости поглощается и выделяется теплота (теплота Пельтье). Также теплота поглощается и выделяется при протекании электрического тока при наличии градиента температуры (эффект Томсона). Перечисленная теплота должна быть учтена при расчете систем охлаждения с применением ЭП.

Существует ряд работ, посвященных данной тематике, но они не дают четкого ответа на вопрос о получении параметров математической модели, выпускаемых промышленностью ЭП. Так, например, модель из [4] довольно громоздка и неточна, модель в [5] позволяет получить представление о работе ЭП, но на практике не применима. Довольно подробно, основываясь на фундаментальных физических законах, рассмотрен процесс работы ЭП в работе [6]. Работа [7] также посвящена моделированию ЭП, но приведенная модель достаточно громоздка и предназначена скорее для рассмотрения термодинамики самих элементов Пельтье, а не для практических расчетов холодильных установок на ЭП. Анализ литературных источников показывает отсутствие математической модели ЭП, которая может быть применена, основываясь только на справочных данных производителей, без привлечения информации о внутреннем устройстве ЭП и пригодной для практического использования в численном эксперименте, поэтому задача разработки такой модели является актуальной.

1. Цель. Разработка математической модели элементов Пельтье, пригодной для использования в численных расчетах методом конечных-элементов на основе доступных справочных данных. Для отечественного пакета программ АРМ Winmachine эта задача состоит в определении поверхностных и объёмных тепловых потоков ЭП и его коэффициента теплопроводности.

2. Математическая модель ЭП. В справочной документации на выпускаемые в настоящее время элементы Пельтье можно найти графики эффективной тепловой мощности, которые представляют собой семейство графиков поглощаемого теплового потока на холодной грани элемента в зависимости от разности температур холодной и горячей грани для разных значений протекающего электрического тока [3]. Эти зависимости представляются семейством прямых (рис. 2).

Используя графики рисунка 2, по силе электрического тока и тепловым сопротивлениям системы охлаждения можно определить разность температур граней элемента Пельтье, абсолютное значение этих температур и тепловые потоки холодной и горячей граней. В данном случае стоит задача по этому семейству графиков определить потоки тепла в математической модели элемента Пельтье для реализации метода конечных элементов.

При работе элемента Пельтье на его холодной грани поглощается, а на горячей грани выделяется тепловая мощность Пельтье

$$Q_{\text{П}} = \Pi I, \quad (1)$$

где Π – коэффициент Пельтье, В; I – сила протекающего тока, А.

В объёме элемента Пельтье по закону Джоуля-Ленца выделяется тепловая мощность

$$Q_{\text{Дж}} = I^2 R, \quad (2)$$

где R – активное сопротивление элемента Пельтье, Ом.

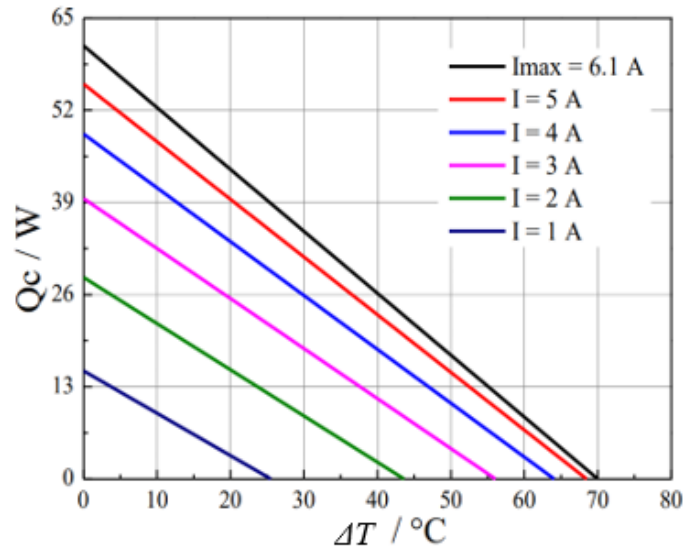


Рис. 2. Эффективная тепловая мощность элемента Пельтье TEC1-12706

Кроме того, через элемент Пельтье проходит тепловой поток с плотностью

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (3)$$

где λ – усреднённый (эффективный) коэффициент теплопроводности элемента Пельтье, Вт/(К·м); x – координата по оси, перпендикулярной плоскости элемента Пельтье, м.

Кроме перечисленного, в объёме ЭП температура не одинакова и поэтому при протекании тока также будет поглощаться и выделяться теплота (эффект Томсона). В справочной документации на ЭП не приводятся использованные полупроводниковые материалы и их термоэлектрические свойства. Поэтому величину теплоты Томсона рассчитать нельзя. Теплота Томсона меньше той, что выделяется/поглощается на гранях ЭП, на это указано и в работе [7], поэтому мы будем пренебрегать эффектом Томсона.

Некоторую неточность в модель будет привносить конечное количество р-п переходов в ЭП. При проведении теплотехнических расчетов холодильных устройств с применением ЭП, серийно выпускаемых промышленностью, количество конечных элементов в расчётной модели меньше, чем количество р-п переходов в ЭП (например, в TEC1-12706 их 127). Кроме того, в конструкции ЭП тепловые потоки отдельных переходов «усредняются» металлизацией керамических граней и самими гранями, что подтверждается однородностью термограмм рабочей поверхности ЭП. Поэтому неравномерностью тепловых потоков граней при применении ординарных промышленных ЭП можно пренебречь, что позволяет рассматривать одномерную модель ЭП.

Распределение температуры внутри элемента Пельтье толщиной L схематично показано на рисунке 3, а. Внешний тепловой поток холодной грани обозначен как Q_c . Поток Q_h – поток тепла, отводимый от горячей грани элемента Пельтье через радиатор во внешнюю среду.

Определение зависимости, описывающей распределение температуры в элементе Пельтье, сводится к решению уравнений для теплового потока [8]:

$$\vec{q} = \alpha T \vec{j} - \lambda \nabla T, \quad (4)$$

и плотности электрического тока

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} - \alpha \nabla T), \quad (5)$$

где q – тепловой поток, Вт/м²;

α – коэффициент термоЭДС (Зеебека), В/К;

j – плотность электрического тока, А/м²;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(К·м);

σ – удельная электропроводность, См/м;

E – напряжённость электрического поля, В/м.

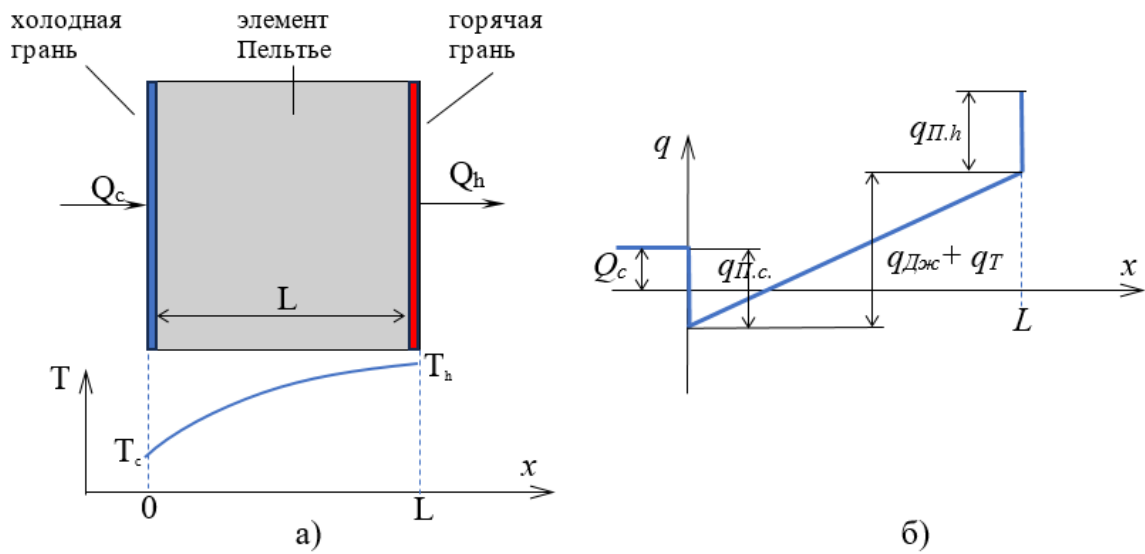


Рис. 3. Распределение температуры внутри элемента Пельтье (а) и тепловой поток через него (б)

В скалярной одномерной форме эти уравнения примут вид:

$$q = \alpha T j - \lambda \frac{dT}{dx}, \quad (6)$$

$$j = \sigma \left(E - \alpha \frac{dT}{dx} \right), \quad (7)$$

Из закона сохранения энергии следует, что $\nabla \vec{q} = \vec{j} \vec{E}$. Так как мы рассматриваем одномерный случай проводников с постоянной площадью поперечного сечения, то $\vec{j} = j_0 \vec{e}_x$ и закон сохранения энергии запишется как $\frac{dq}{dx} = j_0 E$. Подставляя в это уравнение тепловой поток из (6) и напряжённость электрического поля из (7), получим одномерное дифференциальное уравнение для определения температуры:

$$\frac{d}{dx} \left(\alpha T j_0 - \lambda \frac{dT}{dx} \right) = \frac{j_0^2}{\sigma} + \alpha j_0 \frac{dT}{dx}. \quad (8)$$

В первом приближении примем, что коэффициент теплопроводности, коэффициент Зеебека и удельная электропроводность постоянны. Тогда уравнение (8) переходит в уравнение Фурье:

$$-\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{j_0^2}{\sigma}, \quad (9)$$

где $\frac{j_0^2}{\sigma} = \frac{RI^2}{AL}$ – объёмная плотность джоулева потока тепла, Вт/м²; A – площадь элемента Пельтье, м².

Найдем решение этого уравнения при заданной температуре горячей грани ($T|_{x=L} = T_h$) и тепловом потоке холодной грани ($q|_{x=0} = Q_c/A$), что соответствует приводимым данным в справочных данных ЭП.

Из уравнения (9) общее решение для распределения температуры по толщине ЭП:

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{j_0^2}{\sigma\lambda}x + C_1, \quad T = -\frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{x^2}{2} + C_1x + C_2. \quad (10)$$

Используя заданные начальные условия, получим:

$$T_h = -\frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{L^2}{2} + C_1L + C_2, \quad \frac{Q_c}{A} = \alpha j_0 C_2 - \lambda C_1,$$

$$C_1 = \frac{\left(T_h + \frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{L^2}{2}\right)\alpha j_0 - \frac{Q_c}{A}}{\alpha j_0 L + \lambda}, \quad C_2 = \frac{L\frac{Q_c}{A} + \left(T_h + \frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{L^2}{2}\right)\lambda}{\alpha j_0 L + \lambda},$$

значит, искомое распределение температуры по толщине элемента Пельтье:

$$T = -\frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{x^2}{2} + \frac{\left(T_h + \frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{L^2}{2}\right)\alpha j_0 - \frac{Q_c}{A}}{\alpha j_0 L + \lambda}x + \frac{L\frac{Q_c}{A} + \left(T_h + \frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{L^2}{2}\right)\lambda}{\alpha j_0 L + \lambda}. \quad (11)$$

При $x = 0$ температура по формуле (11) равна температуре холодной грани $T = T_c$. Подставив это значение в (11) и выразив поглощаемое холодной гранью теплоту Q_c , получим:

$$Q_c = -\left(A\frac{\lambda}{L} + \alpha I\right)(T_h - T_c) + \alpha T_h I - \frac{1}{2}I^2 R. \quad (12)$$

Полученная формула описывает ту же зависимость, что и график рисунка 2. Используя графические зависимости справочных данных, можно получить формулу (12), а по ней – определить поверхностный поток теплоты Пельтье, объёмный поток джоулевой теплоты и коэффициент теплопроводности.

3. Результаты и обсуждение. Графики рисунка 2 типичны для ЭП, выпускаемых промышленностью. Далее численные значения будут приводиться для элемента Пельтье TEC1-12706 (производство Ruichi, Китай).

По семейству графиков эффективной тепловой мощности элемента Пельтье (рис. 2) методом наименьших квадратов легко получить аппроксимирующее выражение для максимальной поглощаемой теплоты холодной грани в зависимости от силы электрического тока $Q_c(I)|_{\Delta T=0}$ и выражение для максимальной разности температур между гранями в зависимости от силы электрического тока $\Delta T(I)|_{Q_c=0}$. Из них можно получить и зависимость $Q_c = Q_c(\Delta T, I)$. Для ЭП TEC1-12706 эти зависимости имеют вид:

$$Q_c(I)|_{\Delta T=0} = -1.0217I^2 + 16.213I, \quad (13)$$

$$\Delta T(I)|_{Q_c=0} = -2.3921I^2 + 25.834I. \quad (14)$$

Это квадратичные зависимости с нулевым свободным членом.

Зависимость поглощаемой тепловой мощности холодной грани от силы электрического тока и разности температур граней выглядит следующим образом:

$$Q_c = -\frac{-1.0217I^2 + 16.213I}{-2.3921I^2 + 25.834I}\Delta T - 1.0217I^2 + 16.213I, \quad (15)$$

где Q_c – поток тепла через холодную грань элемента Пельтье, Вт; I – сила электрического тока, А; ΔT – разность температур между гранями элемента Пельтье, °С.

Это уравнение по форме совпадает с уравнением (12) и из него можно определить активное сопротивление элемента TEC1-12706 $R = 2.0434$ Ом и коэффициент Пельтье $\Pi = 16.213$ В.

Таким образом, объёмный $\frac{RI^2}{AL}$ и поверхностный $\frac{\Pi I}{A}$ тепловые потоки конечно-элементной модели легко определяются по семейству прямых тепловой мощности элемента Пельтье.

Оценим полученное значение коэффициента Пельтье. Параметры использованных при производстве ЭП TEC1-12706 материалов неизвестны, поэтому оценим их по данным из литературных источников.

Коэффициент Зеебека для теллурида висмута р-типа примем $\alpha = 227$ мкВ/К [9], а для твердого раствора SiGe n-типа $\alpha = -510$ мкВ/К [10]. Тогда при рабочих параметрах ЭП TEC1-12706 $I = 4$ А, $Q_c = 23$ Вт, $\Delta T = 30$ °С, для горячей грани:

$$\Pi(T) = (\alpha_p(T) - \alpha_n(T))TN = (227 \cdot 10^{-6} - 510 \cdot 10^{-6}) \cdot 300 \cdot 64 = 14,504 \text{ В}.$$

Это значение меньше, чем полученное по справочным данным. Это объясняется отсутствием достоверных данных об используемых в производстве материалов.

Рассмотрим вопрос расчёта коэффициента теплопроводности ЭП.

В конструкции ЭП использованы различные материалы, в то время как в модели он будет представлен монолитной однородной средой с единым эффективным коэффициентом теплопроводности. Он может быть получен из формул (12) и (14):

$$\lambda = \frac{L}{A} \left(\frac{-1.0217I^2 + 16.213I}{-2.3921I^2 + 25.834I} - \frac{16.213}{300} I \right). \quad (16)$$

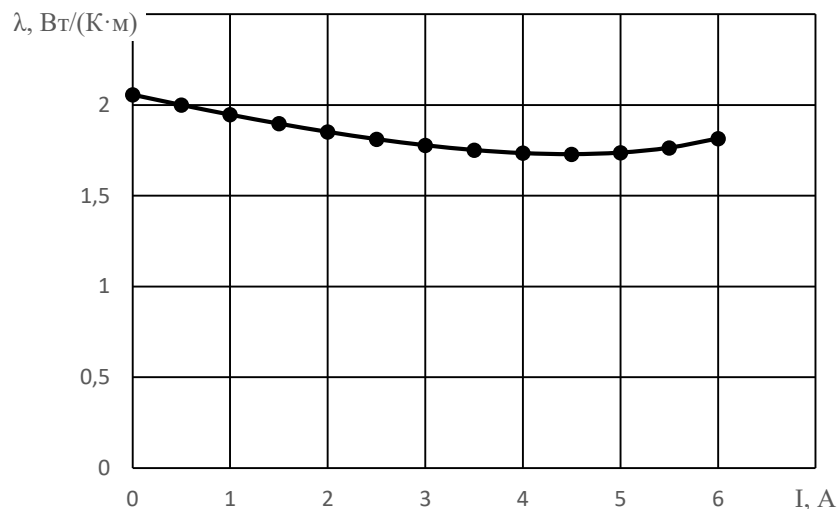


Рис. 4. Расчётный коэффициент теплопроводности ЭП TEC1-12706

График рассчитанного по формуле (16) коэффициента теплопроводности показан на рисунке 4. Полученное значение λ соответствует эффективному коэффициенту теплопроводности, который учитывает теплопроводность использованных полупроводников, керамики граней, припоя и воздушных зазоров. Полученные значения достаточно близки к экспериментальным значениям коэффициента теплопроводности теллурида висмута [10, 11], твёрдого раствора SiGe [10, 12] и оксида алюминия [13]. Расхождение объясняется применением множества материалов, используемых при производстве элементов Пельтье, использованием поликристаллов, сложной конструкцией элемента, а также изменением температуры по объёму элемента в процессе работы.

4. Моделирование методом конечных элементов. В качестве иллюстрации применения полученных параметров элемента Пельтье был произведен расчет параметров термостата. Он имеет наружные размеры $21 \times 24 \times 21$ см³. Теплоизоляция – вспененный

полистирол ($\lambda = 0,05 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$), толщина 50 мм). Теплопроводящий внутренний кожух медный, толщиной 0,8 мм. Радиатор охлаждения горячей грани элемента Пельтье – алюминиевый с принудительным охлаждением ($R_T = 0,2 \text{ °C/Вт}$). Элемент Пельтье - TEC1-12706. Расчеты проводились в конечно-элементной модели (рис. 5), построенной в российской САЕ-системе автоматизированного проектирования APM WinMachine.

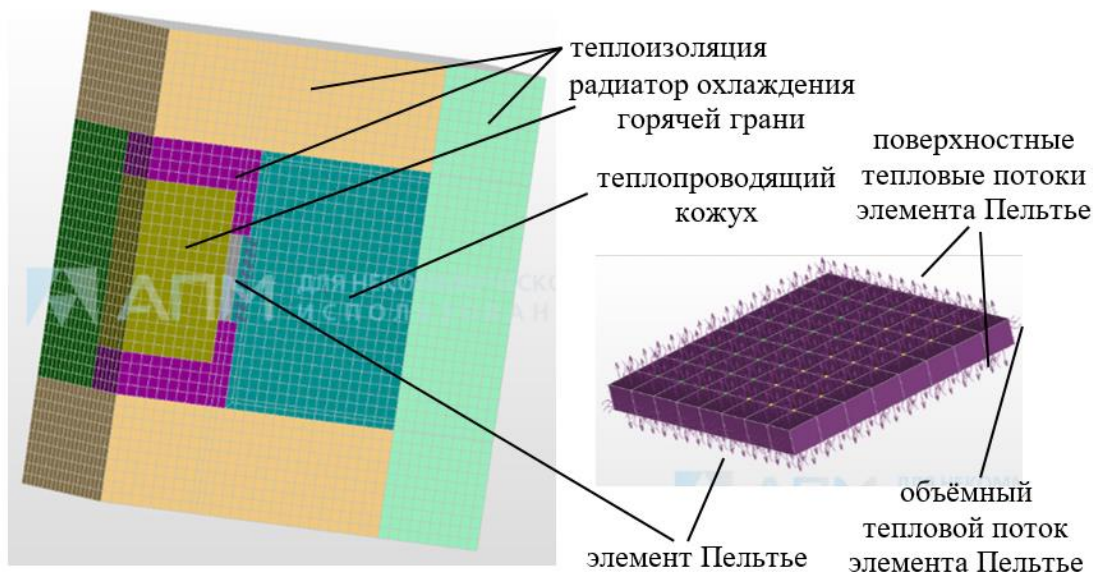


Рис. 5. Конечно-элементная модель термостата в APM WinMachine (тепловые потоки с поверхности термостата не показаны)

Конечные элементы – 8-угольные, тепловые параметры элементов заданы в термических свойствах элементов, тепловые нагрузки элемента Пельтье заданы по приведенным выше формулам (поверхностные и объёмные потоки тепла), теплоотдача от поверхностей задавалась через коэффициент теплоотдачи. Для радиатора охлаждения горячей грани эффективный коэффициент теплоотдачи (расчетное значение $1047 \text{ Вт/(°C}\cdot\text{м)}$) был рассчитан по его тепловому сопротивлению, определённому экспериментально. Конвективный и излучательный поток тепла от внешних поверхностей задавался одним коэффициентом теплоотдачи, также определенным экспериментально на физической модели ($6,4 \text{ Вт/(°C}\cdot\text{м)}$ на боковых поверхностях, $6,1 \text{ Вт/(°C}\cdot\text{м)}$ на верхней поверхности). Результаты расчета теплового поля в APM WinMachine показаны на рисунке 6.

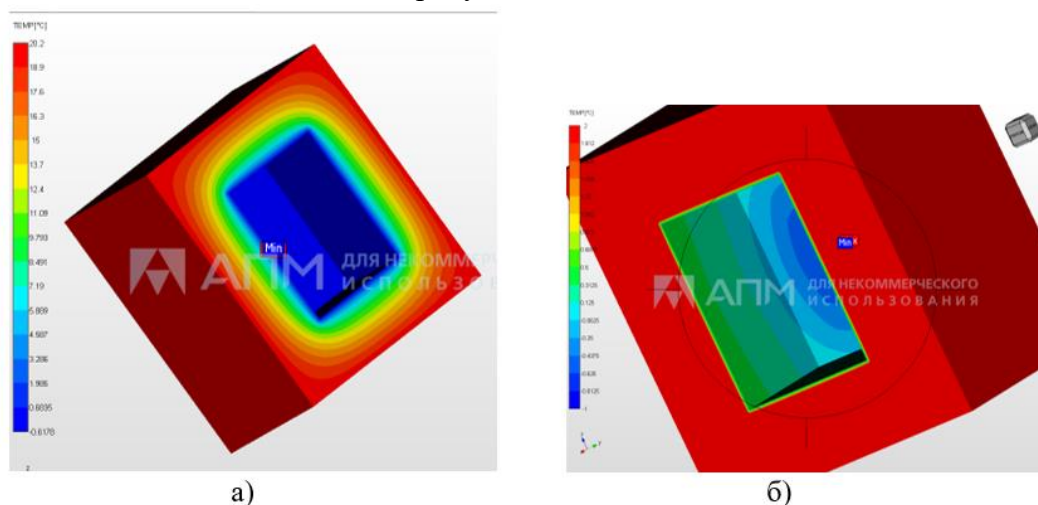


Рис.6. Расчетное температурное поле в термостате на элементе Пельтье: а) автоматический выбор шкалы температуры; б) шкала температуры от -1 до 2 °C

Правый рисунок показывает детальное изменение температуры по поверхности внутреннего теплопроводящего кожуха. Неравномерность нагрева стенки 1,46 °С, что достаточно для целей разработки данного термостата.

Таким образом, САЕ-системы (в нашем случае APM WinMachine) при известных тепловых параметрах элементов Пельтье (определяемых по формулам, приведенным выше) позволяют рассчитать произвольную конструкцию охладителей на этих элементах.

Заключение. Получены формулы, позволяющие по справочным данным элементов Пельтье рассчитать параметры их тепловой модели для использования в конечно-элементном методе расчета. По семейству прямых тепловой эффективности элементов Пельтье можно определить их активное сопротивление, коэффициент Пельтье, эффективный коэффициент теплопроводности. Этих параметров достаточно для описания тепловой модели ЭП, например, для расчета охладителей в пакете программ APM Winmachine.

Приведенная модель применима при теплотехническом расчете устройств с промышленно выпускаемыми ЭП. В случае же специализированных ЭП (например, состоящих из очень малого количества переходов или из материалов с существенной зависимостью коэффициента Зеебека от температуры) требуется учесть особенности конструкции ЭП и свойства их материалов.

Список источников

1. Расчет конструкций, деталей машин и механизмов. – URL: <https://help.apm.ru/structure3d/v20/> (дата обращения: 20.01.2025).
2. RUICHI - электронные компоненты, электротехнические изделия, монтажные компоненты. – URL: <https://ruichi-sz.com/ru/catalog/installation-products/peltier-modules> (дата обращения: 20.01.2025).
3. Specification of Thermoelectric Module. Available at: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/datenblatt-189115-tru-components-tec1-12706-peltier-element-15-v-64-a-65-w-l-x-b-x-h-40-x-40-x-38-mm.pdf>. (accessed: 01/20/2025).
4. Иванов Ю.А. Моделирование и идентификация элемента Пельтье TEC1-12706 для применения в малообъемных биореакторах искусственного ЖКТ рыб / Ю.А. Иванов, А.Д. Лукьянов, Д.Ю. Донской, и др. // *Агроинженерия*, 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 58-65. – DOI: 10.26897/2687-1149-2024-3-58-65.
5. Reddy B.V.K., Barry M., Li J., et al. Mathematical modeling and numerical characterization of composite thermoelectric devices. *International journal of thermal sciences*, 2013, v. 67, pp. 53-63, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2012.11.004.
6. Seifert W., Ueltzen M., Müller E. One-dimensional modelling of thermoelectric cooling. *Physica status solidi (a)*, 2002, v. 194, no. 1, pp. 277-290, DOI: 10.1002/1521-396X(200211)194:1%3C277::AID-PSSA277%3E3.0.CO;2-5.
7. Zavorotneva E.V., Indeitsev D.A., Lukin A.V., et al. Technique for compact modeling of thermoelectric systems. *Computing, telecommunications and Control*, 2021, v. 14, no. 2, pp. 29-48, DOI: 10.18721/JCSTCS.14203.
8. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2005. – Т. 8. – 656 с.
9. Иванова Л.Д. Термоэлектрические и механические свойства твердых растворов Sb₂Te₃–Bi₂Te₃, легированных свинцом / Л.Д. Иванова, Ю.В. Гранаткина, А.Г. Мальчев и др. // *Неорганические материалы*, 2020. – Т. 56. – № 3. – С. 247-252. – DOI: 10.31857/S0002337X20030057.
10. Kim B.S., Dow H.-S., Oh M.-W., et al. Thermoelectric properties of Bi₂Te₃ material doped with lanthanum by mechanical alloying. *Synthesis and reactivity in inorganic, metal-organic, and nano-metal chemistry*, 2008, v. 38, pp. 143-147, DOI: 10.1080/15533170801922647.
11. Васильев А.Е. Термоэлектрические свойства твердых растворов Bi₂Te_{2,7}Se_{0,3}, легированных тулием / А.Е. Васильев, М.Н. Япрынцев, О.Н. Иванов и др. // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*, 2018. – Т. 8. – № 4(29). – С. 162-170.
12. Кузнецов Ю.М. Легирование термоэлектрического наноструктурированного твердого раствора Si_{1-x}Gex (x ~ 0,3) донорными и акцепторной примесью в процессе синтеза методом электроимпульсного плазменного спекания / Ю.М. Кузнецов, И.В. Ерофеева, М.В. Дорохин и др. // *Перспективные материалы*, 2024. – № 7. – С. 18-33. – DOI: 10.30791/1028-978X-2024-7-18-33.

13. Абызов А.М. Оксид алюминия и алюмооксидная керамика (Обзор). Часть 1. Свойства Al_2O_3 и промышленное производство дисперсного Al_2O_3 / А.М. Абызов // Новые огнеупоры, 2019. – № 1. – С. 16-23.

Безик Дмитрий Александрович. Канд. техн. наук, доцент, директор института энергетики и природопользования, Брянский государственный аграрный университет. AuthorID: 16673, SPIN: 1052-9774, ORCID: 0000-0003-1883-716X, bda20101@yandex.ru, 243365, Россия, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, ул. Советская, д. 2а.

Бычкова Татьяна Викторовна. Канд. пед. наук, доцент кафедры автоматизации, физики и математики, Брянский государственный аграрный университет. AuthorID: 284108, SPIN: 2592-1200, ORCID: 0000-0002-7457-8783, tanyabychkova@mail.ru, 243365, Россия, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, ул. Советская, д. 2а.

UDC 681.5.015.22: 621.565.83

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.009

Determination of the parameters of the thermal model of Peltier elements

Dmitry A. Bezik, Tatyana V. Bychkova

Bryansk state agrarian university,

Bryansk, Russia, tanyabychkova@mail.ru

Abstract. The issues of determining the parameters of the thermal model of Peltier elements necessary for its representation in the computational model of the finite element method are considered. It is shown how, using the reference data of the Peltier element, to obtain an equation approximating its effective thermal power. Using this equation, a method is proposed for determining the effective coefficient of thermal conductivity, volume and surface heat flux density of a Peltier element. These parameters allow you to fully describe the element in a finite element calculation scheme. The obtained values were used to calculate a Peltier element thermostat in the Russian CAE computer-aided design system APM WinMachine.

Keywords: modeling, heat transfer, Peltier element, finite element method, model parameters, APM WinMachine

References

1. Raschet konstrukcij, detalej mashin i mekhanizmov [Calculation of structures, machine parts and mechanisms]. Available at: <https://help.apm.ru/structure3d/v20/> (accessed: 01/20/2025).
2. RUICHI - elektronnye komponenty, elektrotekhnicheskie izdeliya, montazhnye komponenty [RUICHI - electronic components, electrical products, assembly components]. Available at: <https://ruichi-sz.com/ru/catalog/installation-products/peltier-modules> (accessed: 01/20/2025).
3. Specification of thermoelectric module. Available at: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/datenblatt-189115-tru-components-tec1-12706-peltier-element-15-v-64-a-65-w-l-x-b-x-h-40-x-40-x-38-mm.pdf>. (accessed: 01/20/2025).
4. Ivanov Yu.A., Luk'yanov A.D., Donskoj D.Yu. et al. Modelirovanie i identifikaciya elementa Pel't'e TEC1-12706 dlya primeneniya v maloob'emnyh bioreaktorah iskusstvennogo ZhKT ryb [Modeling and identification of the Peltier element TEC1-12706 for use in low-volume bioreactors of the artificial gastrointestinal tract of fish]. Agrozhenneriya [Agrozhenneriya], 2024, vol. 26, no. 3, pp. 58-65, DOI: 10.26897/2687-1149-2024-3-58-65.
5. Reddy B.V.K., Barry M., Li J., et al. Mathematical modeling and numerical characterization of composite thermoelectric devices. International journal of thermal sciences, 2013, v. 67, pp. 53-63, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2012.11.004.
6. Seifert W., Ueltzen M., Müller E. One-dimensional modelling of thermoelectric cooling. Physica status solidi (a), 2002, v. 194, no. 1, pp. 277-290, DOI: 10.1002/1521-396X(200211)194:1%3C277::AID-PSSA277%3E3.0.CO;2-5.
7. Zavorotneva E.V., Indeitsev D.A., Lukin A.V., et al. Technique for compact modeling of thermoelectric systems. Computing, telecommunications and Control, 2021, v. 14, no. 2, pp. 29-48, DOI: 10.18721/JCSTCS.14203.
8. Landau L.D., Lifshic E.M. Elektrodinamika sploshnykh sred [Electrodynamics of continuous media]. M.: Fizmatlit [M.: Fizmatlit], 2005, vol. 8, 656 p.

9. Ivanova L.D., Granatkina Yu.V., Mal'chev A.G., et al. Termoelektricheskie i mekhanicheskie svoystva tverdyh rastvorov Sb₂Te₃–Bi₂Te₃, legirovannyh svincom [Thermoelectric and mechanical properties of lead-doped Sb₂Te₃–Bi₂Te₃ solid solutions]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic materials], 2020, vol. 56, no. 3, pp. 247-252, DOI: 10.31857/S0002337X20030057.
10. Kim B.S., Dow H.-S., Oh M.-W., et al. Thermoelectric properties of Bi₂Te₃ material doped with lanthanum by mechanical alloying. *Synthesis and reactivity in inorganic, metal-organic, and nano-metal chemistry*, 2008, v. 38, pp. 143-147, DOI: 10.1080/15533170801922647.
11. Vasil'ev A.E., Yapryncev M.N., Ivanov O.N., et al. Termoelektricheskie svoystva tverdyh rastvorov Bi₂Te_{2,7}Se_{0,3}, legirovannyh tuliem [Thermoelectric properties of Bi₂Te_{2.7}Se_{0.3} solid solutions doped with thulium]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Bulletin of the South-West State University. Series: Engineering and Technology], 2018, vol. 8, no. 4 (29), pp. 162-170.
12. Kuznecov Yu.M., Erofeeva I.V., Dorohin M.V., et al. Legirovanie termoelektricheskogo nanostrukturirovannogo tverdogo rastvora Si_{1-x}Gex ($x \sim 0,3$) donornymi i akseptornoj primesyami v processe sinteza metodom elektroimpul'snogo plazmennogo spekaniya [Doping of thermoelectric nanostructured solid solution Si_{1-x}Gex ($x \sim 0.3$) with donor and acceptor impurities during synthesis by electric pulse plasma sintering]. *Perspektivnye materialy* [Perspective materials], 2024, no. 7, pp. 18-33, DOI: 10.30791/1028-978X-2024-7-18-33.
13. Abyzov, A.M. Oksid alyuminiya i alyumooksidnaya keramika (Obzor). Chast' 1. Svoystva Al₂O₃ i promyshlennoe proizvodstvo dispersnogo Al₂O₃ [Aluminum oxide and alumina ceramics (Review). Part 1. Properties of Al₂O₃ and industrial production of dispersed Al₂O₃]. *Novye ognepupory* [New refractories], 2019, no. 1, pp. 16-23.

Безик Дмитрий Александрович. *Candidate of technical sciences, associate professor, director of the Institute of energy and environmental management, Bryansk state agrarian university. AuthorID: 16673, SPIN: 1052-9774, ORCID:0000-0003-1883-716X, bda20101@yandex.ru, 243365, Russia, Bryansk region, Vygonichsky district, Kokino village, Sovetskaya str., 2a.*

Бычкова Татьяна Викторовна. *Candidate of pedagogical sciences, associate professor of the Department of automation, physics and mathematics, Bryansk state agrarian university. AuthorID: 284108, SPIN: 2592-1200, ORCID:0000-0002-7457-8783, tanyabychkova@mail.ru, 243365, Russia, Bryansk region, Vygonichsky district, Kokino village, Sovetskaya str., 2a.*

Статья поступила в редакцию 13.02.2025; одобрена после рецензирования 01.04.2025; принята к публикации 10.04.2025.

The article was submitted 02/13/2025; approved after reviewing 04/01/2025; accepted for publication 04/10/2025.

УДК 621.311: 621.331

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.010

Моделирование электромагнитных полей в тяговых сетях, оснащенных средствами повышения электромагнитной безопасности

Крюков Андрей Васильевич¹, Суслов Константин Витальевич²,
Середкин Дмитрий Александрович¹, Воронина Екатерина Викторовна¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск, *and_kryukov@mail.ru*

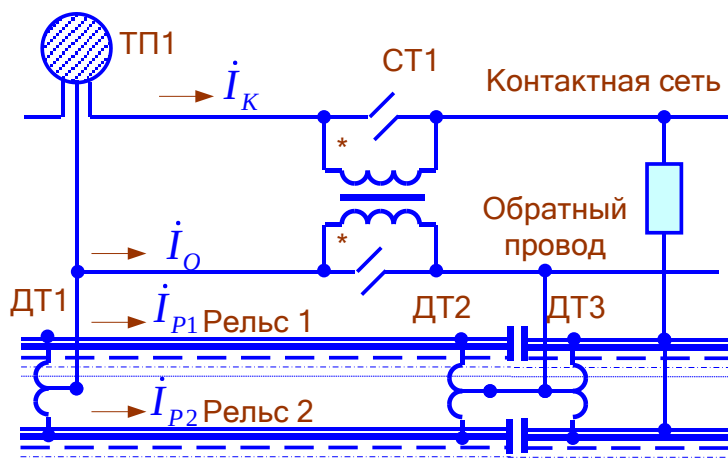
²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, Москва

Аннотация. Цель представленных в статье исследований состояла в определении эффективности применения специализированных трансформаторов (СТ), включаемых в рассечку контактной сети (КС) и дополнительного обратного провода, для снижения электромагнитных загрязнений на объектах магистральных железных дорог. Для реализации сформулированной цели были разработаны компьютерные модели системы тягового электроснабжения (СТЭ) магистральной железной дороги переменного тока с напряжением в КС 25 кВ. СТЭ была оснащена СТ и дополнительными обратными проводами для усиления экранирующего действия рельсового пути с целью снижения напряженностей электромагнитного поля (ЭМП), негативно влияющего на персонал, население и окружающую среду. Проведено многовариантное моделирование для определения эффективности использования СТ. Для сравнения были выполнены расчеты ЭМП типовой СТЭ, в которой СТ не применялись. Моделирование осуществлялось в программном продукте Fazonord, разработанном в ИрГУПС и позволяющем рассчитывать режимы СТЭ и определять ЭМП тяговой сети (ТС) различного конструктивного исполнения. На основе полученных результатов было показано, что установка специализированных трансформаторов относительно небольшой мощности в 225 кВ·А, включаемых в рассечку контактной сети (КС) и дополнительного обратного провода, позволяет существенно улучшить условия электромагнитной экологии. Такой способ не требует значительных капитальных затрат и может быть реализован на действующих и проектируемых участках электрифицированных железных дорог. Компьютерное моделирование показало, что данный подход позволяет снизить средние величины напряженностей на высоте 1,8 метра для электрического поля на 20 %, а для магнитного – на 166 %. Аналогичные показатели для высоты 0,5 м соответственно равны 20 и 190 %. Физический механизм снижения интенсивности ЭМП состоит в усилении экранирующего действия рельсового пути. Используемый при решении вопросов электромагнитной экологии подход является оригинальным и отличается от известных следующими положениями: системность, заключающаяся в возможности расчета ЭМП с учетом свойств и характеристик сложной СТЭ и питающей электроэнергетической системы; универсальность, обеспечивающая моделирование тяговых сетей различных конструкций; адекватность внешней среде, достигаемая учетом профиля подстилающей поверхности, подземных коммуникаций, искусственных сооружений железнодорожного транспорта, таких, как галереи, мосты и тоннели; комплексность, обеспечиваемая совмещением расчетов режима и определением напряженностей ЭМП.

Ключевые слова: магистральные железные дороги, тяговые сети, электромагнитные поля, моделирование

Цитирование: Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей в тяговых сетях, оснащенных средствами повышения электромагнитной безопасности / А.В. Крюков, К.В. Суслов, Д.А. Середкин, Е.В. Воронина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2(38). – С. 113-127. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.010.

Введение. На объектах электрифицированных железных дорог имеются мощные источники ЭМП, которые оказывают негативное влияние на персонал, окружающую среду и электронное оборудование [1, 2]. В этих условиях развиваются патологии нервной, сердечно-сосудистой, репродуктивной, эндокринной и других систем организма человека. Возникают неврастенические проявления, повышенное потоотделение, тремор пальцев рук, изменения электрической активности головного мозга, проблемы в центральной и вегетативной нервных системах, нестабильность артериального давления и пульса, кардиоваскулярные нарушения [3].



Важным параметром данного метода является расстояние между отсасывающими трансформаторами. Выбор его оптимального значения необходимо осуществлять с учетом режимных особенностей участка. Кроме того, в схеме (рис. 1) обратный провод для его эффективного использования должен монтироваться как можно ближе к контактной подвеске.

Обзор литературы. Моделированию электромагнитных полей ЛЭП и ТС посвящено большое число работ. Вопросы использования программных модулей Comsol Multiphysics для расчета ЭМП, генерируемых вблизи высоковольтных линий электропередачи, рассмотрены в [4]. Представленные авторами результаты демонстрируют эффективность использования электростатических и магнитостатических модулей Comsol Multiphysics для расчета ЭМП на многих уровнях вблизи ЛЭП. Полученные ЭМП сравниваются с рекомендациями Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений. Анализ ЭМП на трассе высоковольтной ЛЭП с выделением влияния ключевых параметров представлен в [5]. К ним относятся: конфигурация поперечного сечения ЛЭП, уровень напряжения, токи нагрузки и величины несимметрии, тип провода, удельное сопротивление почвы и экранирующие эффекты близлежащих металлических конструкций, таких, как здания, заборы и трубопроводы. Обобщены результаты вычисления обширного набора вариантов.

Анализ электромагнитного поля между линией электропередачи и железной дорогой представлен в [6]. Основная цель проведенных исследований заключалась в создании строгой методологии и программного обеспечения, способных решать проблему электромагнитных связей в трехфазных системах. Дано краткое введение в метод конечных разностей, применяемый для оценки сложного ЭМП и выработки практической стратегии управления полем для

снижения негативных воздействий на окружающую среду. Разработанная авторами модель обеспечивает гибкость в ЭМП в широком диапазоне конфигураций, возникающих на практике. Используемый программный продукт обеспечивает моделирование, которое дает возможность глубокого изучения физических аспектов ЭМП, создаваемых воздушными ЛЭП вблизи любой металлической конструкции. Показано, что с увеличением ее длины повышается потенциал помех.

В [7] рассматривались ЭМП ЛЭП 132 кВ, которые рассчитывались на основе закона Био-Савара и уравнений Максвелла. Для упрощения расчета магнитного поля был применен метод наложения. Показано, что в настоящее время трассы высоковольтных ЛЭП стали проходить внутри городов. Магнитное поле вблизи них опасно для людей, а также фауны и флоры. Оно вызывает рак и некоторые другие заболевания, такие, как лейкемия. Измерения были выполнены с использованием системы цифровой экспозиции в Джохоре, Малайзия. Доказано, что рациональное расположение фаз может значительно снизить интенсивность ЭМП, а увеличение высоты на 8 м уменьшит напряженность на 79 %.

Результаты теоретических исследований, связанных с поглощением электромагнитной энергии и оценкой эффективности мер защиты персонала от воздействия ЭМП, приведены в [8]. Показано, что величины напряженностей зависят от расстояния между опорами. Описаны меры защиты от негативного влияния ЭМП. Данные, характеризующие уровни ЭМП под проводами линий 500 кВ, приведены в [9]. Расчеты выполнены для горизонтального и вертикального расположения проводников в сбалансированных и несбалансированных условиях. Моделирование проведено с помощью Matlab. Результаты сравнивались со стандартом IEEE для уровней безопасности в отношении воздействия ЭМП на человека.

Результаты анализа распределения ЭМП на высоковольтных подстанциях приведены в [10]. Представлены последние достижения в области моделирования ЭМП с помощью автоматизированного проектирования (САПР). Составные элементы подстанции (опоры, выключатели, шины, трансформаторы и т. д.) были представлены в виде трехмерных моделей и сохранены в базе данных в среде САПР SolidWorks. Разработанное программное обеспечение извлекает координаты элементов и на основе конкретных нагрузок вычисляет ЭМП. Описана трехмерная модель ячейки 400 кВ. Распределения ЭМП представляются на трехмерной модели САПР. Это позволяет визуализировать и определять области высокой концентрации ЭМП. Проведено сравнение между измерениями и смоделированным электрическим полем.

Модель для исследования ЭМП промышленной частоты, создаваемого высоковольтной ЛЭП, представлена в [11]. На ее основе определена напряженность электрического поля под ЛЭП и проведен анализ его структуры при вариациях расстояния между фазами линии и порядка их расположения для двухцепной ЛЭП и др. По результатам моделирования можно прогнозировать ЭМП под воздушной ЛЭП, что важно для защиты окружающей среды.

Анализ распределения электрического поля на трассе ЛЭП напряжением 400 кВ проведен в [12]. Отмечается, что ЭМП высоковольтных ЛЭП представляет серьезную угрозу для здоровья людей, работающих на открытом воздухе. Помехи от ЛЭП могут быть электростатическими и электромагнитными. Воздействие ЭМП повышает риск лейкемии, нейропсихологических расстройств и рака. Электрическое поле рассчитывается с использованием программного пакета ANSYS на базе метода конечных элементов. На основе полученных результатов можно определить допустимое расстояние, на котором могут находиться люди.

Оценка уровней влияния на человека ЭМП, вызванного высоковольтными ЛЭП, представлена в [13]. Отмечается, что с ростом числа ЛЭП сверхвысокого напряжения (СВН) усиливается электромагнитное загрязнение окружающей среды. Поэтому исследование ЭМП на рабочей частоте ЛЭП СВН имеет большое значение для снижения их негативного воздей-

ствия. Описан алгоритм моделирования ЭМП вокруг ЛЭП СВН, реализованный на основе метода заряда. Он позволяет вычислять напряженности с помощью Matlab в нормальных и неполнофазных режимах. Кроме того, на его основе могут быть выбраны мероприятия по уменьшению интенсивности ЭМП ЛЭП СВН.

Результаты моделирования ЭМП ЛЭП 330 кВ, расположенных вблизи зданий, описаны в [14]. На основе проектных требований к ЛЭП 330 кВ моделируется и анализируется ЭМП промышленной частоты вблизи ЛЭП и над зданием. Трехмерный метод конечных элементов используется для анализа распределения ЭМП вокруг и внутри типичной модели здания. Рассматриваются влияния на распределение ЭМП здания, расположенного вблизи и под линией. Предлагается модель здания, которое может быть построено из разных материалов. Результаты вычислений показывают экранирующий эффект и большое искажение электрического поля вблизи контура здания. Обсуждается влияние на напряженность электрического поля материала здания, высоты ЛЭП, количества этажей и ориентации окон, что важно для проектирования и строительства ЛЭП.

Методика моделирования ЭМП ТС вблизи контактных сетей и рельсов представлена в [15]. Рассмотрены аспекты электромагнитной совместимости (ЭМС) между компонентами ТС и прилегающей территорией. На железных дорогах применяются интегрированные системы, в которых электроэнергия используется для движения поездов, а также сигнализации, телекоммуникационных установок, питания центров управления и т. д. Проблемы ЭМС могут возникать не только в ТС, но и в связанных с ней сегментах. Тяговые сети должны работать безопасно. Кроме того, необходимо обеспечивать устойчивость инфраструктуры к электромагнитным помехам.

Метод расчета низкочастотного ЭМП вокруг линий электропередачи 15 кВ предложен в [16]. По решению правительства Монголии начаты работы по электрификации отдаленных городов и сельских районов и подключению их к центральному электроснабжению. Внедряются новые методы и технологии для передачи электроэнергии на большие расстояния. Введен новый стандарт напряжения 15 кВ. С момента пилотного запуска построено и эксплуатируется 4279 км ЛЭП 15 кВ и 268 подстанций. Для оценки уровней электромагнитного загрязнения от ЛЭП 15 кВ разработана расчетная методика определения напряженностей ЭМП в конкретной точке с использованием основных параметров и геометрических размеров опор ЛЭП.

Результаты расчетов ЭМП воздушных ЛЭП приведены в [17]. Представлен численный алгоритм расчета ЭМП с помощью метода граничных элементов. Он основан на интегральном уравнении, которое позволяет полностью определить задачу и сократить количество переменных, необходимых для ее решения. Предложенная методология может быть использована для нахождения градиентов потенциала не только по поверхности проводников, но и в любом интересующем месте пространства. Также приведен анализ влияния заземленных элементов на распределение поля. Сравнение с аналитическими результатами показывает высокую точность определения ЭМП. Показано, что заземленные элементы, которые обычно не учитываются, оказывают заметное влияние на ЭМП и могут быть учтены с помощью предложенной методологии.

Сравнение ЭМП вокруг ЛЭП различных конструкций проведено в [18]. Отмечается, что генерация ЭМП обусловлена изменяющимся во времени движением электрических зарядов. ЭМП излучается в окружающую среду электротехническими устройствами. Расчет ЭМП важен для оценки возможных рисков для здоровья человека. Растущая тенденция к использованию электроэнергии связана с увеличением передаваемой мощности и, следовательно, более высоким уровнем ЭМП. Моделирование было реализовано в программном обеспечении ANSYS.

Результаты исследования ЭМП на тяговой подстанции (ТП) Xijiang приведены в [19]. ЭМП изучалось с помощью измерений и расчетов. Также получены характеристики напряженности ЭМП промышленной частоты, радиопомех и их затухания на расстоянии. На основе сканирования получены параметры ЭМП, охватывающие полосу от 9 кГц до 1 ГГц. Чтобы уменьшить влияние высоковольтной ЛЭП предложена и применена новая схема измерений. Полученные результаты показали, что напряженности ЭМП вокруг ТП меньше допустимых значений.

Анализ влияния ЭМП, создаваемого электрифицированным железнодорожным участком представлен в [20]. Описан метод расчета собственных и взаимных сопротивлений контактной сети, используемой в Румынии. Проведен анализ влияния ЭМП, создаваемого участком электрифицированной железной дороги на металлические объекты, расположенные вблизи ТС. Полученные результаты дают важную информацию об уровнях электромагнитного влияния на окружающую среду.

Методы прогнозирования ЭМП на территориях высоковольтных подстанций, основанные на нечетких моделях, описаны в [21]. Показано, что ЭМП коррелируют с расположением оборудования и спецификой электрической нагрузки. Электромагнитные поля, создаваемые внутри типичной высоковольтной подстанции 220/66 кВ, моделировались с использованием конечно-разностной временной области. Разработано большое количество М-скриптов Matlab для расчета ЭМП. Рассмотрены различные конфигурации шин и графики нагрузки. Для проверки адекватности моделирования ЭМП фиксировались с помощью измерителей поля. Получено приемлемое расхождение между результатами моделирования и измерений.

ЭМП подстанций также проанализированы в статьях [22, 23]. В [22] отмечается, что снижение электромагнитного загрязнения из-за наличия электрических устройств в жилых районах, таких, как ЛЭП, подстанции и трансформаторы, является важной задачей. Из-за воздействия ЭМП эти устройства могут приводить к серьезным проблемам, таким как детская лейкемия и рак. Чтобы гарантировать здоровье людей коммунальные службы и другие организации могли принимать меры для снижения интенсивности ЭМП. Авторами проанализированы уровни воздействия ЭМП четырех реальных подстанций и соответствующих им распределительных фидеров. С помощью этих измерений и расчетов проведено сравнение с нормативными уровнями. В [23] выполнена оценка ЭМП внутри трансформаторных подстанций 400/110 кВ, 110/10 кВ и 35/10 кВ. В связи с тем, что геометрия элементов таких объектов сложная, был применен трехмерный подход к анализу ЭМП. Расчеты проводились для квазистатических состояний на частоте сети 50 Гц.

Вопросы электромагнитной совместимости и безопасности на трассах электрифицированных железных дорог рассмотрены в монографии [24] и статье [25]. В [24] отмечается сложность проблемы ЭМС в современной системе тягового электроснабжения, которая включает тяговую сеть, подвижной состав, оснащенный статическими преобразователями мощности, сигнальные системы, а также вспомогательное оборудование станций. Задачи ЭМС, требуют многоэтапного подхода, при этом вначале проблема должна быть идентифицирована, а затем определены ее границы с точки зрения соответствующих элементов и подсистем. Далее следует предложить теоретическую модель, например, с помощью эквивалентных схем, методов конечных элементов или других инструментов, чтобы оценить связанные электромагнитные явления, такие как характеристики распространения ЭМП и возможное экранирование. Результаты должны оцениваться по характеристикам источников. В зависимости от условий безопасности они могут быть сложными и трудоемкими. Для получения полного и точного результата необходимо свести неопределенность к минимуму. В книге дано общее описание же-

лезнодорожных систем с особым акцентом на элементы, которые влияют на общий электромагнитный профиль. Приведен обзор процессов управления, стандартов и правил. Подробно рассмотрены принципы, применимые на железной дороге.

В [25] подчеркивается, что транспортная инженерия представляет собой область, связанную со сложными электромагнитными средами. Поэтому моделирование ЭМС является важной частью проектирования и эксплуатации. Дан обзор существующих методов обеспечения ЭМС в области железнодорожного транспорта и суммированы достижения и недостатки. Электромагнитные поля, генерируемые высокоскоростными транспортными системами, проанализированы в [26]. Подчеркивается, что потенциальные риски для здоровья пассажиров и окружающей среды, связанные с ЭМП, вызванными работой высокоскоростных транспортных систем, стали серьезной проблемой. Магнитная индукция может вызывать физиологические эффекты в тканях организма. Приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений напряженностей ЭМП в рельсово-колесных системах. Для оценки воздействия на пассажиров учитывались вклады поля, создаваемые ТС, а также системами привода и подвески. Для сравнения были рассмотрены пиковые значения ЭМП.

Анализ аспектов моделирования и измерения параметров, определяющих условия ЭМС и безопасности на железнодорожных подстанциях проведен в [27]. Представлен глобальный аспект железнодорожных энергетических инфраструктур. Представлена высокочастотная модель и проведена проверка ее соответствия стандартам ЭМС. Моделировался каждый компонент инфраструктуры, а расчеты ЭМП сравнивались с измерениями. Результаты моделирования и анализа электромагнитной обстановки в ТС представлены в [28]. На основе теории многопроводных ЛЭП создана математическая модель ТС для изучения распределения тока в каждом проводнике. Метод конечных элементов использовался для создания имитационной модели ТС в нормальном рабочем состоянии и режимах замыкания контактного провода на рельсы. Моделировалось магнитное поле промышленной частоты, создаваемое ТС.

Анализ описанных публикаций позволяет сделать вывод о том, что в них рассмотрены важные аспекты, связанные с определением ЭМП, создаваемых ЛЭП и тяговыми сетями, и анализом условий электромагнитной безопасности и экологии. Однако метод решения задачи моделирования ЭМП, обеспечивающий определение ЭМП ТС, оснащенных СТ с обратным проводом, в рассмотренных работах не представлен. Такой метод может быть основан на алгоритмах, приведенных в [29, 30] и реализованных в программном комплексе Fazonord. Предварительные результаты анализа ЭМП ТС, оборудованных СТ, описаны в [31]. Ниже приведены новые модели, позволяющие рассчитывать напряженности ЭМП в ТС с СТ с учетом высших гармоник (ВГ), генерируемых выпрямительными электровозами переменного тока [32].

Методика моделирования. Моделирование режимов работы системы электроснабжения магистральной железной дороги осуществлялось с помощью метода фазных координат [29-31]. Полученные токи и напряжения позволяют произвести расчет ЭМП в сечении многопроводной системы с учетом гармонических искажений [32], что особенно важно при решении задач электромагнитной экологии, так как смесь полей разных частот усиливает негативное воздействие ЭМП на персонал, население и окружающую среду [33]. Для этого по найденным значениям потенциалов и токов $\dot{\mathbf{i}}^{(k)}$ осуществляется расчет зарядов $\dot{\mathbf{T}}^{(k)}$ проводов, после чего могут быть определены составляющие напряженностей электрического $\dot{\mathbf{E}}_x, \dot{\mathbf{E}}_y$ и магнитного $\dot{\mathbf{H}}_x, \dot{\mathbf{H}}_y$ полей:

$$\mathfrak{Z}_E(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{\mathbf{T}}^{(k)} \rightarrow \dot{\mathbf{E}}_x, \dot{\mathbf{E}}_y; \quad \mathfrak{Z}_H(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{\mathbf{i}}^{(k)} \rightarrow \dot{\mathbf{H}}_x, \dot{\mathbf{H}}_y,$$

где $\mathfrak{Z}_E(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, $\mathfrak{Z}_H(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – операторы; индекс E относится к электрическому полю, а H – к магнитному; $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ – наборы пространственных координат.

Затем находятся амплитудные значения $E_{\max}$, $H_{\max}$ напряженностей ЭМП

$$\Theta_E(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{E}_x, \dot{E}_y \rightarrow E_{\max}; \quad \Theta_H(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{H}_x, \dot{H}_y \rightarrow H_{\max},$$

где $\Theta_E(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, $\Theta_H(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ – операторы.

Учет движения поездов осуществлялся с помощью имитационных моделей, представляющих собой наборы мгновенных схем, каждая из которых отвечает определенным положениям поездов на участке.

Тяговые сети переменного тока характеризуются наличием значительных гармонических искажений, что связано с особенностями конструкции современных электропоездов. Алгоритм расчета напряженностей ЭМП с учетом ВГ включает следующие этапы [32].

1. Выполняются расчеты режимов для всех контролируемых ВГ и определяются заряды и токи проводов

$$\dot{\mathbf{T}}^{(s)}, \dot{\mathbf{I}}^{(s)}, s = 1, 3, 5 \dots 39.$$

2. Вычисляются горизонтальные $\dot{E}_x^{(s)}$ и вертикальные $\dot{E}_y^{(s)}$ составляющие напряженностей ЭМП для каждой гармоники, включая основную

$$\mathfrak{T}_E^{(s)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{\mathbf{T}}^{(s)} \rightarrow \dot{E}_x^{(s)}, \dot{E}_y^{(s)}; \quad \mathfrak{T}_H^{(s)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{\mathbf{I}}^{(s)} \rightarrow \dot{H}_x^{(s)}, \dot{H}_y^{(s)}.$$

3. Определяются суммарные значения составляющих напряженностей $\dot{E}_{\Sigma x}, \dot{E}_{\Sigma y}; \dot{H}_{\Sigma x}, \dot{H}_{\Sigma y}$.
4. Рассчитываются амплитудные значения напряженностей ЭМП

$$\Theta_E(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{E}_{\Sigma x}, \dot{E}_{\Sigma y} \rightarrow E_{\Sigma \max}; \quad \Theta_H(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{H}_{\Sigma x}, \dot{H}_{\Sigma y} \rightarrow H_{\Sigma \max}.$$

Описанный подход является оригинальным и отличается от известных следующими положениями: системность, заключающаяся в возможности моделирования ЭМП с учетом свойств и характеристик сложной системы тягового электроснабжения (СТЭ) и питающей электроэнергетической системы; универсальность, обеспечивающая расчет режимов ТС различных конструкций; адекватность внешней среде, достигаемая учетом профиля подстилающей поверхности, подземных коммуникаций, искусственных сооружений ЖД транспорта, таких как галереи, мосты и тоннели; комплексность, обеспечиваемая совмещением расчетов режима и определением напряженностей ЭМП.

Результаты и обсуждение. Задача улучшения электромагнитной экологии рассматривалась на примере СТЭ, включающей следующие элементы: двухпутную тяговую сеть 25 кВ, протяженностью в 40 км, представленную в виде 10 участков по 4 км; питающие ЛЭП 220 кВ; тяговые подстанции с трансформаторами 40 МВ·А. На каждом участке были установлены СТ, включаемые в рассечку КС и обратных проводов, смонтированных на опорах ТС. Для сравнения были выполнены расчеты ЭМП типовой СТЭ, в которой СТ не применялись.

Тяговые нагрузки создавались движением пяти грузовых поездов массой 5800 т в четном и нечетном направлениях с интервалом 30 минут. Для анализа был выбран промежуток времени с 50 по 100 минуту, отвечающий полному заполнению участка поездами. Контроль токов, напряжений и электромагнитных полей осуществлялся в его начале. Результаты моделирования ЭМП представлены на рис. 2 – 8 и в табл. 1.

На рис. 2, 3 приведены зависимости амплитуд напряженностей электрического поля от времени t : $E_{\max} = E_{\max}(t)$ и $H_{\max} = H_{\max}(t)$, показывающие, что эти параметры заметно изменяются при движении поездов по участку. Указанные графики построены для двух ситуаций: в первой

СТ отсутствовали, а во второй были включены в рассечку КС и обратного провода. Напряженности ЭМП рассчитывались для двух значений высоты точки наблюдения: 1,8 и 0,5 м, что позволяет оценить их воздействие на персонал и окружающую природную среду.

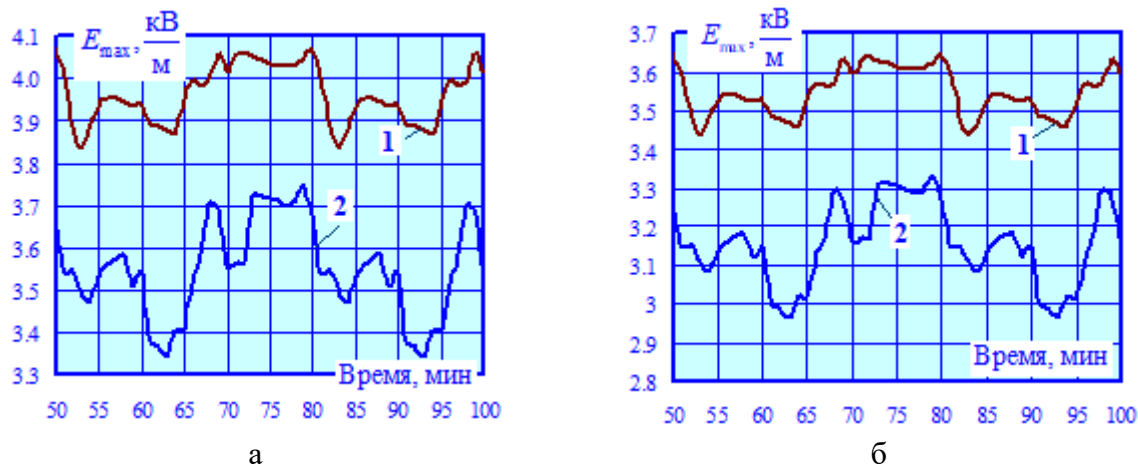


Рис. 2. Динамика изменений амплитуд напряженностей электрического поля при $x=0$: а – на высоте 1,8 м; б – на высоте 0,5 м; 1 – СТ отсутствуют; 2 – СТ включены

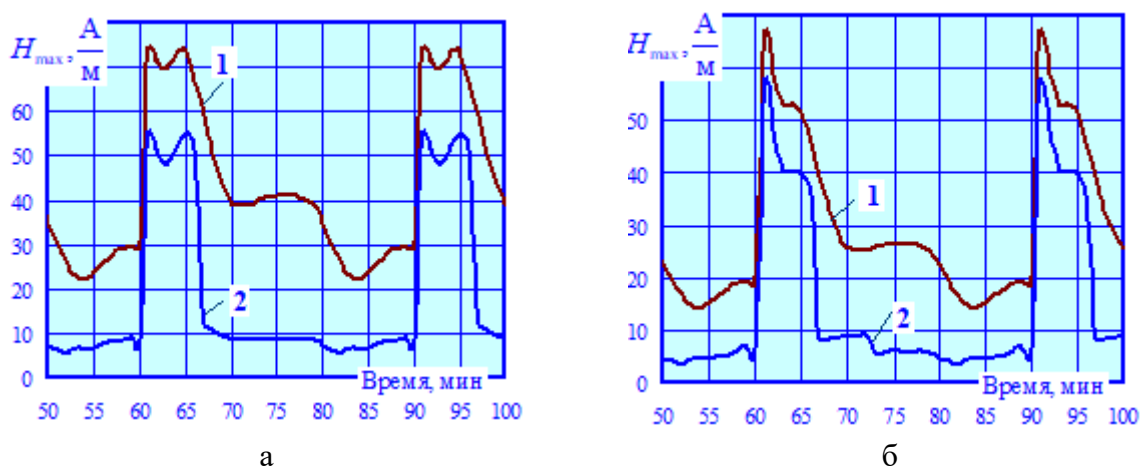


Рис. 3. Динамика изменений амплитуд напряженностей магнитного поля $x=0$: а – на высоте 1,8 м; б – на высоте 0,5 м; 1 – СТ отсутствуют; 2 – СТ включены

На рис. 4 приведены сравнительные диаграммы $E_{\max} = E_{\max}(t)$ и $H_{\max} = H_{\max}(t)$, построенные для принятых значений высот y . На рис. 5 и 6 показаны графики $E_{\max} = E_{\max}(x)$ и $H_{\max} = H_{\max}(x)$, где x – координата оси, направленной перпендикулярно трассе железной дороги.

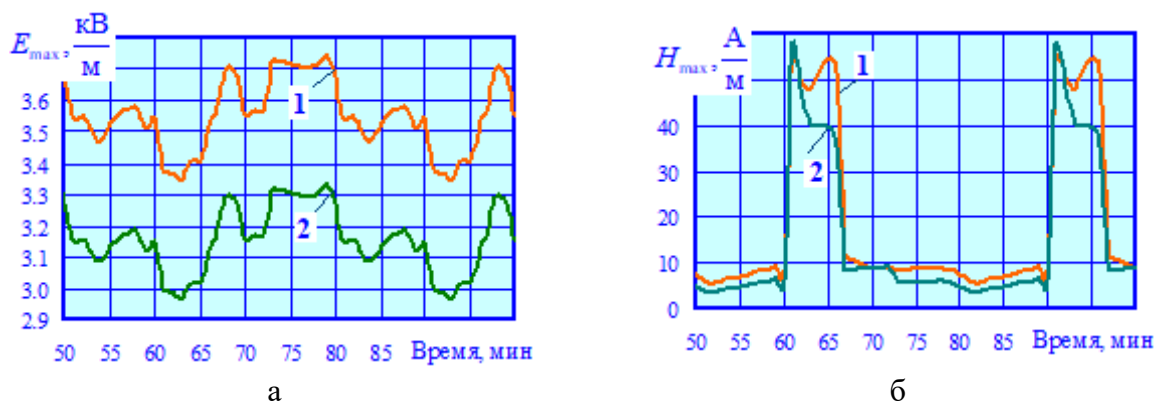


Рис. 4. Сравнение амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей на разных высотах наблюдения $x = 0$: 1 – высота 1,8 м; 2 – высота 0,5 м

В таблице 1 приведены максимальные и средние значения амплитуд напряженностей ЭМП.

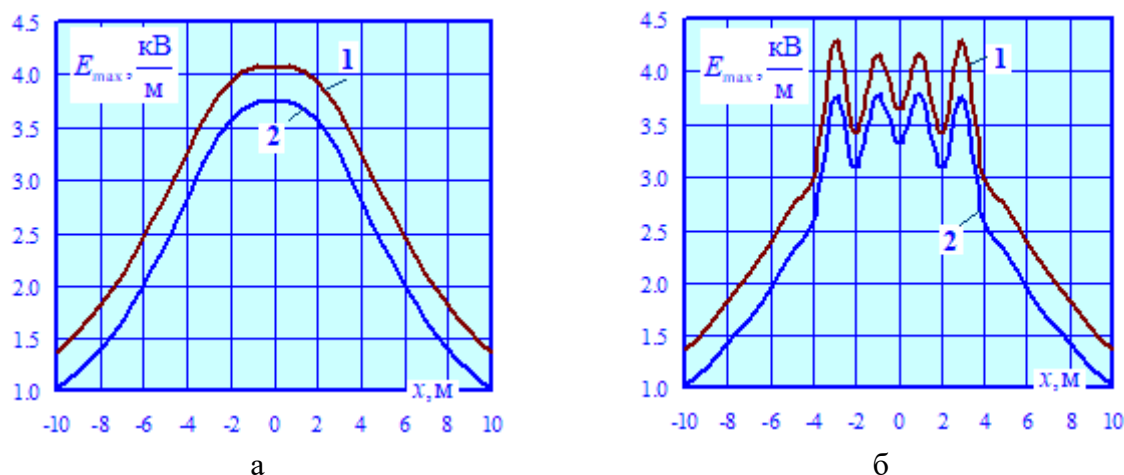


Рис. 5. Зависимость максимумов амплитуд электрического поля от координаты x : а – высота 1.8 м; б – высота 0,5 м; 1 – СТ отсутствуют; 2 – СТ включены

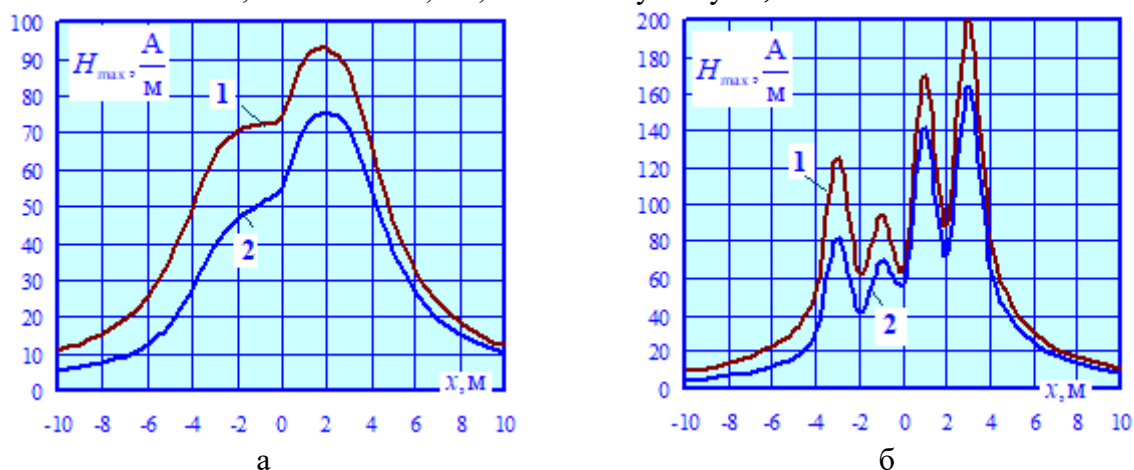


Рис. 6. Зависимости максимумов амплитуд магнитного поля от координаты x : а – высота 1.8 м; б – высота 0,5 м; 1 – СТ отсутствуют; 2 – СТ включены

Таблица 1. Максимальные и средние значения амплитуд напряженностей ЭМП

Параметр	Показатель	$y = 1.8 \text{ м}$			$y = 0.5 \text{ м}$		
		СТ отсутствуют	СТ включены	Различие, %	СТ отсутствуют	СТ включены	Различие, %
E_{max} , кВ/м	Ср. значение	2,67	2,23	20	2,64	2,19	20
	Максимум	4,07	3,74	9	4,29	3,78	14
H_{max} , А/м	Ср. значение	20,01	7,53	166	23,33	8,06	190
	Максимум	93,11	75,54	23	199,67	164,04	22

Полученные результаты моделирования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Электромагнитно несбалансированная тяговая сеть создает значительные уровни напряженности ЭМП, при этом ЭМП ТС состоит из смеси составляющих разных частот, что усиливает его негативное воздействие на персонал, население и окружающую среду [33].
2. Путем установки специализированных трансформаторов относительно небольшой мощности (225 кВ·А), включаемых в рассечку КС и дополнительного обратного провода, возможно заметно снизить напряженности ЭМП и улучшить условия электромагнитной безопасности и экологии.

3. Данный подход не требует значительных капитальных затрат и может быть реализован на действующих и проектируемых участках электрифицированных железных дорог.
4. Уровни снижения напряженностей ЭМП с помощью СТ зависят от многих факторов, таких, как: масс поездов, графиков движения составов, профилей пути, характеристик используемых локомотивов, электрических свойств грунта, профиля рельефа (насыпей, выемок, скосов). Поэтому решение о применении СТ должно приниматься на основе результатов компьютерного моделирования по описанным в данной работе моделям.
5. В особо критичных зонах по условиям безопасности и экологии можно использовать дополнительные меры по снижению негативного воздействия ЭМП, описанные в работе [31].

На основе анализа публикаций и результатов компьютерного моделирования установлено, что электромагнитно несбалансированные тяговые сети 25 кВ могут создавать ЭМП значительной интенсивности, которые могут оказывать негативное влияние на людей и окружающую среду, особенно в ситуации прохождения железной дороги через территории жилой застройки. Учитывая значительную протяженность электрифицированных ЖД и массовое строительство новых линий, ущербы от негативных воздействий ЭМП можно признать существенными. Кроме того, для подключения тяговых подстанций используются высоковольтные ЛЭП, также негативно влияющие на окружающую среду.

Компьютерное моделирование, проведенное в программном комплексе Fazonord, показало, что негативные влияния ТС могут быть значительно снижены на основе применения специализированных трансформаторов, включаемых в рассечку КС и дополнительного обратного провода. В ходе дальнейших исследований по данной тематике запланировано решить следующие задачи:

- 1) разработать алгоритмы и компьютерные модели для определения оптимального расстояния между СТ;
- 2) предложить методику выбора рациональных координат подвески обратного провода;
- 3) вблизи трассы железной дороги располагается значительное число проводящих конструкций, которые могут оказывать влияние на характер распределения ЭМП в пространстве, окружающем тяговую сеть; к ним можно отнести опоры ТС, мосты, современные здания с металлическими несущими элементами, путепроводы и т. д.; вблизи этих сооружений электромагнитное поле становится трехмерным и задача его моделирования существенно усложняется; для ее решения можно использовать подход, предложенный в [34], основанный на концепции проводников ограниченной длины.

Заключение. Мощные источники ЭМП, расположенные на железнодорожных станциях и перегонах, могут оказывать негативное влияние на персонал, окружающую среду и современное электронное оборудование информационных систем и телекоммуникаций. Воздействие смесей ЭМП, включающих составляющие различных частот, вызывают патологии нервной, сердечно-сосудистой, репродуктивной, эндокринной и других систем организма человека; при этом возникают следующие симптомы: неврастенические проявления, повышенное потоотделение, тремор пальцев рук, изменения электрической активности головного мозга, функциональные нарушения центральной и вегетативной нервной системы; нестабильность артериального давления и пульса, кардиоваскулярные отклонения.

Эффективным средством снижения негативных влияний ЭМП ТС, не требующим значительных капитальных затрат и реализуемым на действующих и проектируемых участках электрифицированных железных дорог, является установка специализированных трансформаторов относительно небольшой мощности (225 кВ·А), включаемых в рассечку КС и дополнительного обратного провода. Компьютерное моделирование показало, что данный подход позволяет снизить средние величины напряженностей на высоте 1,8 метра для электрического

поля на 20 %, а для магнитного – на 166 %. Аналогичные показатели для высоты 0,5 м соответственно равны 20 и 190 %. Физический механизм снижения интенсивности ЭМП состоит в усилении экранирующего действия рельсового пути.

Список источников

1. Blake Levit B. Electromagnetic fields: a consumer's guide to the issues and how to protect ourselves. iUniverse, 1995, 462 p.
2. Suslov, K., Kryukov, A., Voronina, E., Ilyushin, P. Consideration of the influence of supports in modeling the electromagnetic fields of 25 kV traction networks under emergency conditions. Global energy interconnection, 2024, vol. 7, iss 4, pp. 528-540. DOI: 10.1016/j.gloi.2024.08.004.
3. Титов Е.В. Анализ возможных последствий влияния электромагнитного загрязнения окружающей среды на биологические объекты / Е.В. Титов, Д.А. Медведева // Актуальные вопросы энергетики. – Омск, 2021. – С. 150-153.
4. Rachedi B.A., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using Comsol Multiphysics. 2014 International conference on electrical sciences and technologies in Maghreb (CISTEM), IEEE, 2014, DOI:10.1109/CISTEM.2014.7076989.
5. Liu J., Ruan W., Fortin S. et al. Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis. 2002 Proceedings, International Conference on power system technology, IEEE, 2002, DOI: 10.1109/ICPST.2002.1053575.
6. Al Dhalaan S.M., Elhribawy M.A. A quantitative study of the electromagnetic field coupling between electric power transmission line and railway. CCECE 2003 – Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a caring and humane technology, IEEE, 2003, DOI: 10.1109/CCECE.2003.1226432.
7. Ali Orozi Sougui, Mohd Zarar Mohd Jenu. Measurement and analysis of magnetic field radiation near 132 kV power lines. 2014 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetic (APACE), IEEE, 2014, pp. 207-210, DOI: 10.1109/APACE.2014.7043781.
8. Mahapatra S., Dey T.K., Ghosh J. Estimation of the fields radiated from HT power lines. 2008 10th International conference on electromagnetic interference & compatibility, IEEE, 2008, pp. 395-397.
9. Xiao L., Holbert K.E. Development of software for calculating electromagnetic fields near power lines. 2014 North American power symposium (NAPS), IEEE, 2014, pp. 1-6, DOI: 10.1109/NAPS.2014.6965378.
10. Purcar M., Munteanu C., Avram A. et al. CAD/CAE modeling of electromagnetic field distribution in hv substations and investigation of the human exposure. 2016 International Conference on applied and theoretical electricity (ICATE), IEEE, 2016, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ICATE.2016.7754698.
11. Xu L., Li Y., Yu J. et al. Research on electric field of high-voltage transmission line power frequency. 2006 International conference on power system technology, IEEE, 2006, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICPST.2006.321493.
12. Das H., Gogoi K., Chatterjee S. Analysis of the effect of electric field due to High Volt-age Transmission lines on humans. 2015 1st Conference on power, dielectric and energy management at NERIST (ICPDEN), IEEE, 2015, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICPDEN.2015.7084491.
13. Wang F., Wang W., Jiang Z. et al. Analysis of the line-frequency electric field in-tensity around EHV transmission. 2010 International conference on electrical and control engineering, IEEE, 2010, pp. 3343-3346. DOI: 10.1109/ICECE.2010.815.
14. Yang B., Wang S., Wang Q. et al. Simulation and analysis for power frequency electric field of building close to power transmission lines. 2014 IEEE International symposium on electromagnetic compatibility (EMC), IEEE, 2014, pp. 451-454, DOI: 10.1109/ISEMC.2014.6899014.
15. Oancea C.D., Calin F., Golea V. On the electromagnetic field in the surrounding area of railway equipment and installations. 2019 International Conference on electromechanical and energy systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2019, pp. 1-5, DOI: 10.1109/SIELMEN.2019.8905871.
16. Bat-Erdene B., Battulga M., Tuvshinzaya G. Method of calculation of low-frequency electromagnetic field around 15 kV transmission lines. 2020 IEEE International conference on power and energy (PECon), Penang, Malaysia, 2020, pp. 40-43, DOI: 10.1109/PECon48942.2020.9314436.
17. Duane I., Afonso M., Paganotti A. et al. Computation of the electromagnetic fields of overhead power lines with boundary elements. 2022 IEEE 20th Biennial conference on electromagnetic field computation (CEFC), Denver, CO, USA, 2022, pp. 1-2, DOI: 10.1109/CEFC55061.2022.9940848.
18. Medved' D., Zbojovský J., Pavlík M. et al. Comparison of electromagnetic fields around electric power lines. 2020 21st International scientific conference on electric power engineering (EPE), Prague, Czech Republic, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269217.
19. Zeng X., Ma H., Pi C. et al. Research on electromagnetic radiation of Xijiang traction substation. 2018 IEEE International symposium on electromagnetic compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific symposium on

- electromagnetic compatibility (EMC/APEMC), Suntec City, Singapore, 2018, pp. 24-27, DOI: 10.1109/ISEMC.2018.8393731.
20. Oancea C.D., Calin F., Golea V. Analysis of the influences of the electromagnetic field produced by an electrified railway section. 2020 7th International Conference on energy efficiency and agricultural engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EEAE49144.2020.9279005.
21. Ghanian S.M. Fuzzy prediction of the electromagnetic fields inside high voltage substations. 2016 IEEE International Conference on high voltage engineering and application (ICHVE), Chengdu, China, 2016, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800809.
22. Morales J.A., Gavela P., Bretas A.S. Electromagnetic fields in distribution feeders and electrical substations analysis: A study case in Ecuador. 2015 North American power symposium (NAPS), Charlotte, NC, USA, 2015, pp. 1-6, DOI: 10.1109/NAPS.2015.7335084.
23. Nikolovski S., Klaić Z., Kraus Z. et al. Computation and measurement of electromagnetic fields in high voltage transformer substations. The 33rd International convention MIPRO, Opatija, Croatia, 2010, pp. 641-646.
24. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic compatibility in railways. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 568 p.
25. Luan Xiaotian, Zhu Haijing, Qiu Bo et al. EMC in rail transportation. Energy procedia, 2016, vol. 104, pp. 526-531, DOI:10.1016/j.egypro.2016.12.089.
26. Kircher R., Klühspies J., Palka R. et al. Electromagnetic fields related to high speed transportation systems. Transportation systems and technology, 2018, vol. 4(2), pp.152-166, DOI:10.17816/transsyst201842152-166.
27. Baranowski S., Ouaddi H., Kone L. et al. EMC analysis of railway power substation modeling and measurements aspects. Infrastructure design, signalling and security in railway, DOI:10.5772/37522.
28. Lu Zh., Yun Zh., Song Ch. Et al. Simulation and analysis for electromagnetic environment of traction network. 2021 XXXIVth General assembly and scientific symposium of the international union of radio science (URSI GASS), IEEE, 2021, DOI: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
29. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск, 2005. – 273 с.
30. Закарюкин В.П. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Москва: Директ-Медиа, 2023. – 156 с.
31. 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, 2018. – 382 с.
32. 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.
33. Закирова А.Р. Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитных полей. / А.Р. Закирова. – Екатеринбург, 2018. – 171 с.
34. Закарюкин В.П. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых системой коротких токоведущих частей / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // System analysis and mathematical modeling, 2021. – № 2. – С. 145-163.

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

Суслов Константин Витальевич. Доктор технических наук, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета "МЭИ", профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета. Author ID: 445976, SPIN: 1161-1920, ORCID: 0000-0003-0484-2857, dr.souslov@yandex.ru, 11250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.

Середкин Дмитрий Александрович. Кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения. AuthorID: 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.2025.38.2.010

Modeling of electromagnetic fields in traction networks equipped with means of increasing electromagnetic safety

Andrey V. Kryukov¹, Konstantin V. Suslov², Dmitry A. Seredkin¹, Ekaterina V. Voronina¹

¹Irkutsk State Transport University,

Irkutsk, Russia, and kryukov@mail.ru

²National Research University "MPEI",

Moscow, Russia

Abstract. The objective of the studies presented in the article was to determine the efficiency of using specialized transformers (ST) included in the contact network (CN) section and an additional return wire to reduce electromagnetic pollution at mainline railway facilities. To achieve this objective, computer models of the traction power supply system (TPS) of an AC mainline railway with a CN voltage of 25 kV were developed. The TPS was equipped with ST and additional return wires to enhance the shielding effect of the track in order to reduce electromagnetic field strengths that have a negative impact on personnel, the population and the environment. Multivariate modeling was performed to determine the efficiency of using ST. For comparison, EMF calculations were performed for a typical TPS in which ST were not used. Modeling was carried out in the Fazonord software product developed at IrGUPS and allowing one to calculate TPS modes and determine EMF of the traction network (TN) of various designs. The obtained results showed that installation of specialized transformers of relatively low power of 225 kVA, included in the section of the compressor station and additional return wire, allows to significantly improve the conditions of electromagnetic ecology. This method does not require significant capital expenditures and can be implemented on existing and planned sections of electrified railways. Computer modeling showed that this approach allows to reduce average values of intensity at a height of 1.8 meters for the electric field by 20%, and for the magnetic field - by 166%. Similar indicators for a height of 0.5 m are 20 and 190%, respectively. The physical mechanism for reducing the intensity of EMF consists in enhancing the shielding effect of the track. The approach used in solving problems of electromagnetic ecology is original and differs from known ones in the following provisions: systematicity, consisting in the ability to calculate EMF taking into account the properties and characteristics of a complex traction power system and the supply electric power system; versatility, ensuring modeling of traction networks of various designs; adequacy to the external environment, achieved by taking into account the profile of the underlying surface, underground communications, artificial structures of railway transport, such as galleries, bridges and tunnels; complexity, ensured by combining calculations of the mode and determination of the EMF strengths.

Keywords: mainline railways, traction networks, electromagnetic fields, modeling

References

1. Blake Levit B. Electromagnetic fields: a consumer's guide to the issues and how to protect ourselves. iUniverse, 1995, 462 p.
2. Suslov, K., Kryukov, A., Voronina, E., Ilyushin, P. Consideration of the influence of supports in modeling the electromagnetic fields of 25 kV traction networks under emergency conditions. Global energy interconnection, 2024, vol. 7, iss 4, pp. 528-540. DOI: 10.1016/j.gloi.2024.08.004.
3. Titov E.V., Medvedeva D.A. Analiz vozmozhnykh posledstviy vliyaniya elektromagnitnogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy na biologicheskiye ob"yekty [Analysis of possible consequences of the influence of electromagnetic pollution of the environment on biological objects]. Aktual'nyye voprosy energetiki [Actual issues of energy, Omsk], 2021, pp. 150-153.
4. Rachedi B.A., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using Comsol Multiphysics. 2014 International conference on electrical sciences and technologies in Maghreb (CISTEM), IEEE, 2014, DOI:10.1109/CISTEM.2014.7076989.
5. Liu J., Ruan W., Fortin S. et al. Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis. 2002 Proceedings, International Conference on power system technology, IEEE, 2002, DOI: 10.1109/ICPST.2002.1053575.
6. Al Dhalaan S.M., Elhirbawy M.A. A quantitative study of the electromagnetic field coupling between electric power transmission line and railway. CCECE 2003 – Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a caring and humane technology, IEEE, 2003, DOI: 10.1109/CCECE.2003.1226432.

7. Ali Orozi Sougui, Mohd Zarar Mohd Jenu. Measurement and analysis of magnetic field radiation near 132 kV power lines. 2014 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetic (APACE), IEEE, 2014. pp. 207-210, DOI: 10.1109/APACE.2014.7043781.
8. Mahapatra S., Dey T.K., Ghosh J. Estimation of the fields radiated from HT power lines. 2008 10th International conference on electromagnetic interference & compatibility, IEEE, 2008, pp. 395-397.
9. Xiao L., Holbert K.E. Development of software for calculating electromagnetic fields near power lines. 2014 North American power symposium (NAPS), IEEE, 2014, pp. 1-6, DOI: 10.1109/NAPS.2014.6965378.
10. Purcar M., Munteanu C., Avram A. et al. CAD/CAE modeling of electromagnetic field distribution in hv substations and investigation of the human exposure. 2016 International Conference on applied and theoretical electricity (ICATE), IEEE, 2016, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ICATE.2016.7754698.
11. Xu L., Li Y., Yu J. et al. Research on electric field of high-voltage transmission line power frequency. 2006 International conference on power system technology, IEEE, 2006, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICPST.2006.321493.
12. Das H., Gogoi K., Chatterjee S. Analysis of the effect of electric field due to High Volt-age Transmission lines on humans. 2015 1st Conference on power, dielectric and energy management at NERIST (ICPDEN), IEEE, 2015, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICPDEN.2015.7084491.
13. Wang F., Wang W., Jiang Z. et al. Analysis of the line-frequency electric field in-tensity around EHV transmission. 2010 International conference on electrical and control engineering, IEEE, 2010, pp. 3343-3346. DOI: 10.1109/iCECE.2010.815.
14. Yang B., Wang S., Wang Q. et al. Simulation and analysis for power frequency electric field of building close to power transmission lines. 2014 IEEE International symposium on electromagnetic compatibility (EMC), IEEE, 2014, pp. 451-454, DOI: 10.1109/ISEMC.2014.6899014.
15. Oancea C.D., Calin F., Golea V. On the electromagnetic field in the surrounding area of railway equipment and installations. 2019 International Conference on electromechanical and energy systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2019, pp. 1-5, DOI: 10.1109/SIELMEN.2019.8905871.
16. Bat-Erdene B., Battulga M., Tuvshinzaya G. Method of calculation of low-frequency electromagnetic field around 15 kV transmission lines. 2020 IEEE International conference on power and energy (PECon), Penang, Malaysia, 2020, pp. 40-43, DOI: 10.1109/PECon48942.2020.9314436.
17. Duane I., Afonso M., Paganotti A. et al. Computation of the electromagnetic fields of overhead power lines with boundary elements. 2022 IEEE 20th Biennial conference on electromagnetic field computation (CEFC), Denver, CO. USA, 2022, pp. 1-2, DOI: 10.1109/CEFC55061.2022.9940848.
18. Medveď D., Zbojovský J., Pavlík M. et al. Comparison of electromagnetic fields around electric power lines. 2020 21st International scientific conference on electric power engineering (EPE), Prague, Czech Republic, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269217.
19. Zeng X., Ma H., Pi C. et al. Research on electromagnetic radiation of Xijiang traction substation. 2018 IEEE International symposium on electromagnetic compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific symposium on electromagnetic compatibility (EMC/APEMC), Suntec City, Singapore, 2018, pp. 24-27, DOI: 10.1109/ISEMC.2018.8393731.
20. Oancea C.D., Calin F., Golea V. Analysis of the influences of the electromagnetic field produced by an electrified railway section. 2020 7th International Conference on energy efficiency and agricultural engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1109/EEAE49144.2020.9279005.
21. Ghania S.M. Fuzzy prediction of the electromagnetic fields inside high voltage substations. 2016 IEEE International Conference on high voltage engineering and application (ICHVE), Chengdu, China, 2016, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICHVE.2016.7800809.
22. Morales J.A., Gavela P., Bretas A.S. Electromagnetic fields in distribution feeders and electrical substations analysis: A study case in Ecuador. 2015 North American power symposium (NAPS), Charlotte, NC, USA, 2015, pp. 1-6, DOI: 10.1109/NAPS.2015.7335084.
23. Nikolovski S., Klaić Z., Kraus Z. et al. Computation and measurement of electromagnetic fields in high voltage transformer substations. The 33rd International convention MIPRO, Opatija, Croatia, 2010, pp. 641-646.
24. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic compatibility in railways. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 568 p.
25. Luan Xiaotian, Zhu Haijing, Qiu Bo et al. EMC in rail transportation. Energy procedia, 2016, vol. 104, pp. 526-531, DOI:10.1016/j.egypro.2016.12.089.
26. Kircher R., Klühspies J., Palka R. et al. Electromagnetic fields related to high speed transportation systems. Transportation systems and technology, 2018, vol. 4(2), pp.152-166, DOI:10.17816/transsyst201842152-166.
27. Baranowski S., Ouaddi H., Kone L. et al. EMC analysis of railway power substation modeling and measurements aspects. Infrastructure design, signalling and security in railway, DOI:10.5772/37522.

28. Lu Zh., Yun Zh., Song Ch. Et al. Simulation and analysis for electromagnetic environment of traction network. 2021 XXXIVth General assembly and scientific symposium of the international union of radio science (URSI GASS), IEEE, 2021, DOI: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560338.
29. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk, 2005, 273 p.
30. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovaniye sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka na osnove faznykh koordinat [Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates]. Moskva: Direkt-Media [Moscow: Direct-Media], 2023, 156 p.
31. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog: modelirovaniye i upravleniye [Electromagnetic safety in railway power supply systems: modeling and control]. Angarsk, 2018, 382 p.
32. Buyakova, N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. et al. Uchet garmonicheskikh iskazheniy pri modelirovanii elektromagnitnykh poley, sozdavayemykh liniyami elektroperedachi, pitayushchimi tyagovyye podstantsii zheleznnykh dorog [Accounting for harmonic distortions in modeling electromagnetic fields generated by power transmission lines supplying railway traction substations]. Elektrichestvo [Electricity], 2022, no. 5, pp. 28-38.
33. Zakirova A.R. Zashchita elektrotekhnicheskogo personala ot vrednogo vozdeystviya elektromagnitnykh poley [Protection of electrical personnel from the harmful effects of electromagnetic fields]. Yekaterinburg, 2018, 171 p.
34. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelirovaniye elektromagnitnykh poley, sozdavayemykh sistemoy korotkikh tokovedushchikh chastey [Modeling of electromagnetic fields generated by a system of short current-carrying parts]. System analysis and mathematical modeling, 2021, no. 2, pp. 145-163.

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

Suslov Konstantin Vitalievich. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Hydropower and Renewable Energy Sources of the National Research University "MPEI", Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering of the Irkutsk National Research Technical University. Author ID: 445976, SPIN: 1161-1920, ORCID: 0000-0003-0484-2857, dr.souslov@yandex.ru, 11250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14.

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, 664074, Russia, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15

Voronina Ekaterina Viktorovna. Postgraduate student of the Department of Electric Power Engineering of Transport of Irkutsk State University of Railway Communications. 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 23.04.2025; одобрена после рецензирования 01.05.2025; принята к публикации 05.05.2025.

The article was submitted 04/23/2025; approved after reviewing 05/01/2025; accepted for publication 05/05/2025.

Теория случайных импульсов электрической нагрузки для жилого сектора

Боровский Андрей Викторович, Юменчук Андрей Анатольевич

Байкальский государственный университет,

Россия, Иркутск, *andrey.yumenchuk@mail.ru*

Аннотация. Предлагается способ имитационного моделирования суточных графиков электрических нагрузок в жилом секторе на основе теории случайных импульсов, объединённой с теорией свёрток. Целью является разработка модели, учитывающей как случайный момент возникновения импульса, так и его случайную длительность и амплитуду. Ранние модели, основанные на свёртке функции энергопотребления типа столбика, описываемой разностью двух функций Хэвисайда, с плотностью вероятности нормального распределения для сдвигов по времени включения бытовых приборов, учитывали только один случайный параметр. Принципиальное отличие предлагаемой в статье модели заключается в учёте трёх параметров, характеризующих каждый отдельный импульс электрической нагрузки. Это позволяет при имитационном моделировании энергопотребления жилищно-бытовых объектов получить результаты, в значительной степени более близкие к действительным величинам потребляемой мощности, а также в большей степени соответствующих реальной динамике роста и снижения уровней потребления электроэнергии. Осуществляется имитационное моделирование энергопотребления небольшого населённого пункта и сравнивается с реальным энергопотреблением поселка сопоставимого размера. Выполняется проверка возможности применения модели к случаям с особыми инфраструктурными условиями, например, отсутствием центрального отопления и водоснабжения. Среди прочего, проверяется возможность получения оптимального результата моделирования с учётом разных категорий потребителей, таких, как работающие и неработающие граждане. Анализируется возможность переноса части нагрузки, не характерной для ночного времени, на другие периоды суток, и влияние переноса указанной нагрузки на точность получаемого результата. По итогам работы описаны достоинства разработанной модели и сделан вывод о возможности её применения в широком спектре задач.

Ключевые слова: стохастические модели энергопотребления, случайные импульсы, теория свёрток, имитационное моделирование, суточный график энергопотребления

Цитирование: Боровский А.В. Теория случайных импульсов электрической нагрузки для жилого сектора / А.В. Боровский, А.А. Юменчук // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2 (38). – С. 128-139. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.011.

Введение. При моделировании энергопотребления в коммунально-бытовом секторе необходимо учитывать, что приборы включаются потребителями в разное время, и время включения прибора в одном жилом помещении никак не зависит от того, какие приборы используются в это время во всех других жилых помещениях. Кроме того, приборы одного и того же типа могут иметь разную мощность в зависимости от производителя и от модели. Вдобавок, длительность работы прибора также является случайной величиной. Из этого следует, что задача, связанная с моделированием потребления электроэнергии в жилом секторе, требует учёта 3-х случайных параметров.

Вероятностные модели энергопотребления рассматривались во множестве научных трудов, в части из них в роли приемников электрической энергии выступали промышленные устройства, такие, как: шлифовальные, токарные, сверлильные станки, буровые и шахтные установки, порталные и башенные краны, рудотермические печи [1-3]. В другой части работ роль приемников электроэнергии отводится бытовым приборам небольших домохозяйств [4-6]. Представленные модели позволяют выполнять имитационное моделирование энергопотребления как небольших объектов в целом, например, отдельных домохозяйств или многоквартирных домов [4, 6], так и отдельных бытовых приборов [5] и промышленных агрегатов [1]. Наиболее часто электрические нагрузки представляют в качестве временных выборок случайных значений потребляемой мощности. В [4]

моделирование графиков электрических нагрузок сводится к задаче аппроксимации ортогональными функциями временных рядов, в [6] – к моделированию случайных временных выборок методом Монте-Карло.

Имитационное моделирование энергопотребления в жилом секторе с использованием ранних вариантов модели, основанных на свёртке функции энергопотребления типа столбика, описываемой разностью двух функций Хэвисайда, с плотностью вероятности нормального распределения [7] и плотностью вероятности распределения Вейбулла для сдвигов по времени включения бытовых приборов [8], демонстрирует хорошие результаты, но учитывает только один случайный параметр – момент времени возникновения импульса t_v . В данной статье задача имитационного моделирования графиков электрических нагрузок сводится к объединению в единое целое теории случайных импульсов с теорией свёрток, что позволяет учесть 3 случайных параметра, характеризующих каждый отдельный импульс нагрузки: момент времени его возникновения t_v , длительность τ_v и амплитуду a_v .

1. Случайные импульсы электрической нагрузки на отрезке времени с постоянной скоростью возникновения импульсов. Рассмотрим случайные импульсы в виде прямоугольников, которые возникают в моменты времени t_v . Такие импульсы обладают случайной амплитудой a_v и случайной длительностью τ_v [9]. Всего получаем три случайных величины: момент возникновения импульса, его амплитуду и длительность. Форма импульса с номером v описывается, таким образом, детерминированной функцией $F(t - t_v, a_v, \tau_v)$. Для сокращения записи будем рассматривать случайные параметры как вектор с двумя случайными компонентами $\mathbf{a}_v = (a_v, \tau_v)$.

Нас будет интересовать электрическая нагрузка, которая описывается случайным процессом:

$$\xi(t) = \sum_v F(t - t_v, \mathbf{a}_v). \quad (1)$$

В качестве примера приведём включение бытовых приборов по утрам в посёлке на 1000 жилых помещений. Примерами включаемых утром приборов могут быть: светильники, электроплиты, чайники, фены, микроволновые печи и другие бытовые приборы. Во-первых, неизвестно, сколько приборов будет включено: 800, 900 или 998. Во-вторых, приборы могут обладать различной мощностью. В-третьих, приборы включаются в разные моменты времени и на разную временную длительность. Все это делает электрическую нагрузку от включения бытовых приборов в посёлке случайным процессом (1).

2. Описание случайного процесса, содержащего последовательность случайных импульсов электрической нагрузки. В статистической физике описание случайного процесса (1) осуществляется при помощи многомерной функции плотности вероятности:

$$w(t_1, t_2 \dots t_n; \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \dots \mathbf{a}_n) dt_1 dt_2 \dots dt_n; d\mathbf{a}_1, d\mathbf{a}_2 \dots d\mathbf{a}_n. \quad (2)$$

Выражение (2) описывает вероятность нахождения случайных величин в интервалах $(t_v; t_v + dt_v)$; $(\mathbf{a}_v; \mathbf{a}_v + d\mathbf{a}_v)$.

Далее целесообразно использовать предположение о статистической независимости всех случайных величин, фигурирующих в формуле (1). В самом деле, жители включают свои бытовые приборы независимо от того, что делается в других домах. Поэтому плотность вероятности (2) распадается на произведения более простых сомножителей:

$$w(t_1, t_2 \dots t_n; \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \dots \mathbf{a}_n) dt_1 dt_2 \dots dt_n d\mathbf{a}_1, d\mathbf{a}_2 \dots d\mathbf{a}_n = \prod_{v=1}^n w_t(t_v) dt_v w_a(\mathbf{a}_v) d\mathbf{a}_v. \quad (3)$$

Возможно ещё одно упрощение задачи. Будем считать, что существуют интервалы времени, на которых импульсы распределены равномерно, т.е. плотность вероятности не зависит от времени:

$$w_t(t) dt = p dt, \quad p = \text{Const}. \quad (4)$$

Здесь p – плотность импульсов во времени, т.е. число импульсов, возникающих в единицу времени.

Если мы рассмотрим реальную запись электрической нагрузки для посёлка или жилого района, то увидим, что таким условиям отвечают интервалы времени от $T = 10$ мин до $T = 1$ час, т.е. высказанное предположение является экспериментально обоснованным.

В теории вероятности показано, что условию (4) отвечает вероятность Пуассона появления на отрезке времени n импульсов:

$$P(n) = \frac{N^n e^{-N}}{n!}, \quad N = pT. \quad (5)$$

На этом пути мы снимем неопределенность с количеством появляющихся импульсов.

Будем искать вероятность события, при котором случайный процесс (1) приводит к значениям электрической мощности в интервале:

$$w(x)dx = P\{x \leq \xi(t) \leq x + dx\}. \quad (6)$$

Учтем, что переменная $\xi(t)$ может оказаться в интервале (6), когда на временном интервале T возникает 1, 2 ... N импульсов. Поэтому:

$$w(x)dx = \sum_{n=1}^N P(n)w(x|n)dx. \quad (7)$$

Здесь $w(x|n)dx$ – вероятность попадания переменной в интервал (6) при условии, что на временном интервале T возникли n импульсов. Формула (7) позволяет вычислять средние значения от произвольных функций следующим образом:

$$\overline{f(\xi)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)w(x)dx = \sum_{n=1}^N P(n) \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)w(x|n)dx = \sum_{n=1}^N P(n) {}^n\overline{f(\xi)}. \quad (8)$$

Условное среднее:

$${}^n\overline{f(\xi)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)w(x|n)dx. \quad (9)$$

Для нахождения (7) и, как следствие, (8), для случайного процесса (1) следует применить аппарат характеристических функций.

3. Характеристическая функция случайного процесса. Характеристической функцией случайной величины x называют среднее от комплексной экспоненты:

$$\varphi_x(u) = \langle e^{iux} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{iux} w(x)dx. \quad (10)$$

Выражение (10) представляет собой преобразование Фурье от плотности вероятности случайной величины. Естественно, что выражение (10) можно обратить:

$$w(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-iux} \varphi_x(u)du. \quad (11)$$

В этом смысле безразлично, что мы задаём, плотность вероятности случайной величины или её Фурье-образ.

Если у нас имеется сумма двух статистически независимых случайных величин

$x = x_1 + x_2$, то:

$$\begin{aligned} \langle e^{iux} \rangle &= \langle e^{iu(x_1+x_2)} \rangle = \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{iu(x_1+x_2)} w(x_1)dx_1 w(x_2)dx_2 = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} e^{iux_1} w(x_1)dx_1 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{iux_2} w(x_2)dx_2 = \langle e^{iux_1} \rangle \langle e^{iux_2} \rangle = \varphi_{x_1}(u) \varphi_{x_2}(u). \end{aligned} \quad (12)$$

Формула (12) очевидным образом обобщается на сумму любого числа статистически независимых случайных величин:

$$\langle e^{iu \sum_{n=1}^N x_n} \rangle = \prod_{n=1}^N \varphi_{x_n}(u). \quad (13)$$

Найдем характеристическую функцию для случайного процесса:

$$\xi_N(t) = \sum_{n=1}^N x_n, \quad x_n = F(t - t_n, \mathbf{a}_n). \quad (14)$$

Фурье-образ функции (14) будет равен:

$$\varphi_\xi(u|N) = \langle e^{iu \sum_{n=1}^N x_n} \rangle = \prod_{n=1}^N \varphi_{x_n}(u), \quad (15)$$

где:

$$\varphi_{x_n}(u) = \langle e^{iux_n} \rangle = \int w(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \int_{-T/2}^{+T/2} e^{iuF(t-t_n, \mathbf{a})} w_t(t_n) dt_n. \quad (16)$$

Мы считаем, что импульсы на интервале T распределены равномерно. Заменим также переменную t_n на t' . Пренебрежём краевыми эффектами. Тогда формула (16) принимает вид (17):

$$\varphi_{x_n}(u) = \frac{1}{T} \int w(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{iuF(t-t',\mathbf{a})} dt'. \quad (17)$$

Найдем теперь Фурье-образ функции условной плотности вероятности (15):

$$\varphi_\xi(u|n) = \left(\int w(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{iuF(t-t',\mathbf{a})} \frac{dt'}{T} \right)^n. \quad (18)$$

Далее определяется Фурье-образ случайного процесса (1):

$$\begin{aligned} \varphi_\xi(u) &= \sum_{n=1}^N \frac{N^n}{n!} e^{-N} \left(\int w(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{iuF(t-t',\mathbf{a})} \frac{dt'}{T} \right)^n = \\ &= e^{-N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{n!} \left(N \int w(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{iuF(t-t',\mathbf{a})} \frac{dt'}{T} \right)^n = \\ &= \exp(p \int w(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \int_{-\infty}^{+\infty} [e^{iuF(t-t',\mathbf{a})} - 1] dt'). \end{aligned} \quad (19)$$

Напомним, что $p = N/T$ – временная плотность импульсов, т.е. число импульсов, приходящихся в среднем на единицу времени.

Рассмотрим выражение (10) и разложим экспоненту в ряд:

$$\begin{aligned} \varphi_x(u) &= \langle e^{iux} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{iux} w(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(iux)^n}{n!} w(x) dx = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(iu)^n}{n!} \int_{-\infty}^{+\infty} x^n w(x) dx = 1 + (iu)\bar{x} + \frac{(iu)^2}{2} \overline{x^2} + \dots \end{aligned} \quad (20)$$

Видим, что при сомножителях ряда, не зависящих от x , стоят моменты случайной величины x среднее, x^2 среднее и т.д.

4. Теория кумулянтов и выражения для средней величины и дисперсии случайного процесса.

Возьмём логарифм от формулы (20):

$$\begin{aligned} \ln \varphi_x(u) &= \ln \left(1 + (iu)\bar{x} + \frac{(iu)^2}{2} \overline{x^2} + \dots \right) = \\ &= \left((iu)\bar{x} + \frac{(iu)^2}{2} \overline{x^2} + \dots \right) - \frac{1}{2} \left((iu)\bar{x} + \frac{(iu)^2}{2} \overline{x^2} + \dots \right)^2 \dots = (iu)\bar{x} + \frac{(iu)^2}{2} (\overline{x^2} - \bar{x}^2) + \dots \end{aligned} \quad (21)$$

Находим, что при первых двух слагаемых в разложении логарифма от характеристической функции $\varphi_x(u)$ стоят среднее $\bar{x}$ и дисперсия $D(x) = \overline{x^2} - \bar{x}^2$ случайной величины x . Переход от разложения (20) к разложению логарифма (21) в статистике называется теорией кумулянтов.

Произведем разложение в квадратных скобках в формуле (19). Предварительно сделаем замену переменных: $t - t' = \theta$.

Такая замена соответствует интегрированию по огибающей импульса:

$$\begin{aligned} \ln \varphi_\xi(u) &= p \int w(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \int_{-\infty}^{+\infty} [e^{iuF(\theta,\mathbf{a})} - 1] d\theta = p \int w(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(iuF(\theta,\mathbf{a}))^n}{n!} - 1 \right] d\theta = \\ &= p \int w(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(iuF(\theta,\mathbf{a}))^n}{n!} d\theta = p \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(iu)^n}{n!} \int w(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \int_{-\infty}^{+\infty} (F(\theta,\mathbf{a}))^n d\theta. \end{aligned} \quad (22)$$

Основываясь на теории кумулянтов, можно получить:

$$\bar{\xi} = p \int w(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\theta,\mathbf{a}) d\theta, \quad (23)$$

$$D(\xi) = p \int w(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \int_{-\infty}^{+\infty} (F(\theta,\mathbf{a}))^2 d\theta. \quad (24)$$

5. Вычисление средней мощности и дисперсии для импульсов электрической нагрузки со случайными амплитудой и длительностью.

В случае прямоугольных импульсов:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} F(\theta, \mathbf{a}) d\theta = a\tau = \varepsilon. \quad (25)$$

Интеграл равен площади под огибающей импульса, т.е. энергии, которую этот импульс содержит. В этом случае по формуле (23) получим:

$$\bar{\xi} = p \int a\tau w(a)w(\tau) da d\tau = p\bar{a} \cdot \bar{\tau} = p\bar{\varepsilon}, \quad (26)$$

т.е. плотность импульсов, умноженную на среднюю энергию, которую импульс содержит.

По формуле (24):

$$D(\xi) = p\bar{a}^2 \cdot \bar{\tau}. \quad (27)$$

Условие применимости теории имеет вид:

$$\frac{\sqrt{D(\xi)}}{\bar{\xi}} \ll 1, \quad (28)$$

что дает:

$$p\bar{\tau} \gg 1, \quad (29)$$

или:

$$\frac{N\bar{\tau}}{T} \gg 1. \quad (30)$$

6. Связь описания средней мощности в теории случайных импульсов и теории свертки. В рассматриваемом случае количество жилых помещений $N \sim 1000$, время работы электрического прибора (например, чайника или микроволновой печи) $\bar{\tau} \sim 1 - 3$ минуты, время интервала усреднения $T \sim 30$ минут. Получаем:

$$\frac{N\bar{\tau}}{T} \cong 100 \gg 1. \quad (31)$$

Таким образом, условия применимости рассмотренной теории выполняются.

В реальных условиях плотность импульсов зависит от времени $p(t)$. Однако, время изменения величины p значительно больше, чем длительность отдельного импульса $\tau \ll T$. Это позволяет в теории свертки заменить отдельный импульс δ -функцией:

$$F(t) = N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t-t')g(t')dt'. \quad (32)$$

Здесь $F(t) \equiv \bar{\xi}(t)$, когда $\bar{\xi}$ медленно зависит от времени.

В случае $\tau \ll T$:

$$f(t-t') \rightarrow \bar{\varepsilon} \cdot \delta(t-t'), \quad (33)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t-t')dt' = \bar{\varepsilon} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t-t')dt' = \bar{\varepsilon}. \quad (34)$$

Интеграл в (32) преобразуется следующим образом:

$$\bar{\xi}(t) = N \int_{-\infty}^{+\infty} f(t-t')g(t')dt' \rightarrow N\bar{\varepsilon} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t')\delta(t-t')dt' = N\bar{\varepsilon}g(t). \quad (35)$$

Для нормального распределения:

$$F(t) = \frac{N\varepsilon}{\sqrt{\pi}\Delta t} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\Delta t}\right)^2}. \quad (36)$$

Таким образом, теория свертки связана с теорией случайных импульсов соотношением:

$$p(t) = \frac{N}{\bar{\varepsilon}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t-t')g(t')dt'. \quad (37)$$

Где $f(t)$ – некоторый усреднённый импульс со средней амплитудой $\bar{a}$ и длительностью $\bar{\tau}$. В условиях, когда амплитуды и длительности импульсов статистически независимы, их произведение равно средней энергии импульсов $\bar{a} \cdot \bar{\tau} = \bar{\varepsilon}$.

Вычисление интеграла по оси времени приводит к постоянной величине:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(t)dt = \frac{N}{\bar{\varepsilon}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t-t')g(t')dt' dt = N, \quad (38)$$

как и должно быть.

7. Имитационное моделирование суточной динамики электрической мощности для жилого поселка с учетом социальной группы пенсионеров. Авторы статьи с

помощью измерительных блоков-ваттметров провели собственное наблюдение за энергопотреблением бытовых приборов в одной из квартир в течение 24 часов одних суток, проживающие – пожилые неработающие люди.

Результаты измерений представлены в Таблице 1 и Таблице 2. Значение напряжения в сети при измерениях составило 217 вольт.

Таблица 1. Мощность, потребляемая бытовыми приборами

Прибор	Потребляемая мощность, Вт
Чайник	1820
Микроволновая печь	1510
Плита	1550 (одна конфорка)
Светодиодная лампа	14
Кондиционер	350
Компьютер	46 (режим ожидания), 190-280 (во время работы)
Монитор	42
Фен	970 (средняя мощность), 1560 (высокая мощность)
Стиральная машина	62 (стирка), 1460 (нагрев воды), 121 (отжим)
Посудомоечная машина	47 (мойка), 1580 (нагрев воды), 28 (ополаскивание, слив)
Холодильник	185
Телевизор	90

Таблица 2. Журнал энергопотребления

Прибор	Потребляемая мощность, Вт	Время начала работы	Время окончания работы	Кол-во приборов
Холодильник	185	1:12	1:27	1
Холодильник	185	4:26	4:41	1
Холодильник	185	6:23	6:38	1
Светодиодные лампы	140	7:00	8:00	10
Чайник	1820	8:30	8:34	1
Микроволновая печь	1510	8:32	8:34	1
Холодильник	185	10:22	10:37	1
Плита	1550	12:50	13:25	1
Холодильник	185	13:01	13:16	1
Чайник	1820	13:02	13:04	1
Микроволновая печь	1510	13:05	13:07	1
Телевизор	90	13:30	15:00	1
Холодильник	185	16:07	16:22	1
Холодильник	185	17:56	18:11	1
Светодиодные лампы	140	18:10	23:50	10

Чайник	1820	18:25	18:29	1
Микроволновая печь	1510	18:28	18:30	1
Посудомоечная машина	47	18:55	18:58	1
Посудомоечная машина	1580	18:58	19:10	1
Телевизор	90	19:05	23:30	1
Посудомоечная машина	47	19:10	19:16	1
Посудомоечная машина	1580	19:16	19:20	1
Посудомоечная машина	28	19:20	19:25	1
Холодильник	185	19:44	19:59	1
Холодильник	185	21:12	21:27	1
Холодильник	185	22:40	22:55	1

На рис.1 продемонстрировано смещение пика нагрузки на дневное время для жилых помещений, в которых проживают неработающие люди.

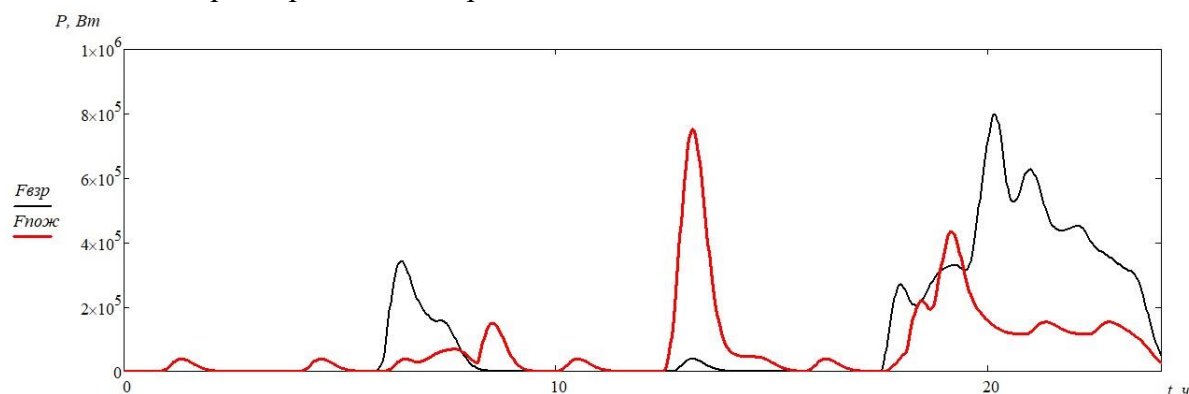


Рис. 1. Функция энергопотребления $F(t)$ для 500 городских квартир, проживающие: неработающие люди – красным; работающие люди – черным. Моделирование с использованием распределения Вейбулла, $\lambda = 0.5$, $k = 2$

Согласно общедоступным данным, опубликованным Федеральной службой государственной статистики, общая численность населения Российской Федерации на 01.01.2024 составила 14615,8 тыс. чел., из них в возрасте старше трудоспособного – 34593,4 тыс. чел., доля от общего числа – 23,7%. В Иркутской области численность населения на 01.01.2024 – 2330,5 тыс. чел., в возрасте старше трудоспособного – 496 тыс. чел., что равно 21,3% от численности населения Иркутской области. Предположим, что 21,3% от общего числа населения Иркутской области являются неработающими пожилыми людьми. На рис. 2 в красном цвете приведен вид графика функции энергопотребления в случае, когда в 21,3% из 500 квартир проживают неработающие люди. На рис. 3 – вид графика функции энергопотребления с учётом доли неработающих пожилых людей при разных значениях параметра масштаба распределения Вейбулла.

Исходя из вида графиков, приведённых на рис. 1 – 3, следует, что пик энергопотребления жилых помещений, в которых проживают неработающие люди, смещён на дневное время суток. Однако, так как процент неработающего населения и населения, старше трудоспособного возраста, относительно общей численности населения невелик, то влияние на вид графика функции энергопотребления, учитывающей все слои населения (рис. 3), проявляется в появлении небольшого колоколообразного пика в дневное время суток, а также незначительном снижении вечернего пика энергопотребления.

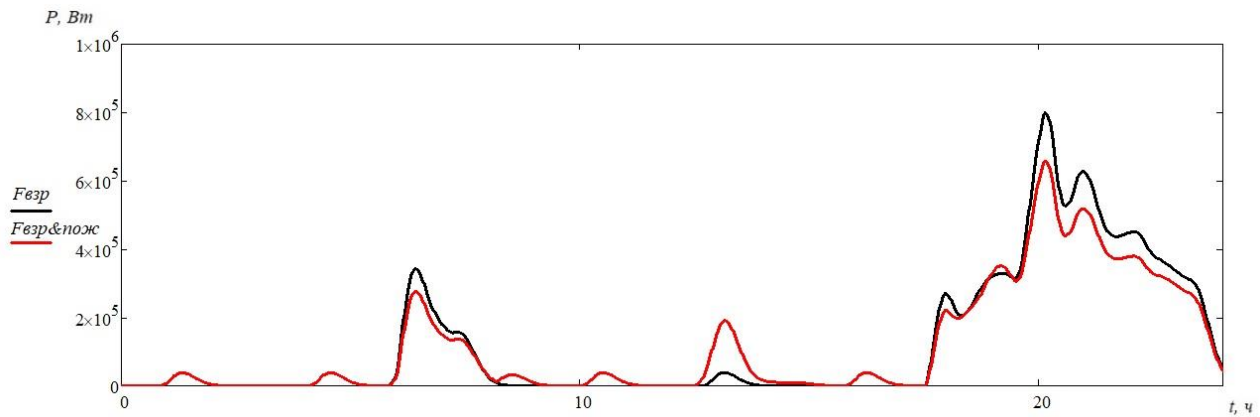


Рис. 2. Функция энергопотребления $F(t)$ для 500 городских квартир, проживающие: только работающие люди – черным; работающие и неработающие люди – красным.

Моделирование с использованием распределения Вейбулла, $\lambda = 0.5$, $k = 2$

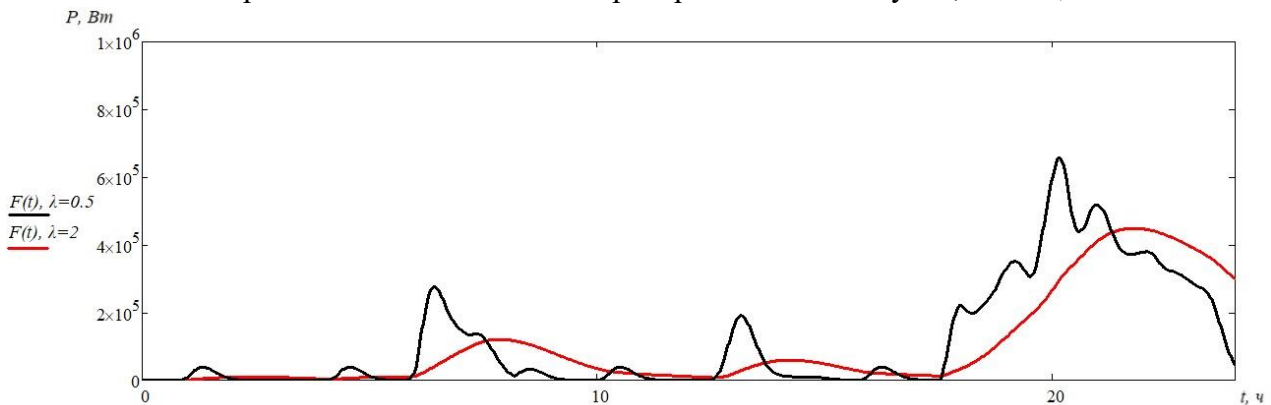


Рис. 3. Функция энергопотребления $F(t)$ для 500 городских квартир, с учётом доли пожилых людей 21,3% для Иркутской области. Моделирование с использованием распределения

Вейбулла: $\lambda = 0.5$, $k = 2$ (черным); $\lambda = 2$, $k = 2$ (красным)

8. Вопросы учета в имитационной модели нагревателей холодной воды в местности без центрального отопления и горячей воды. В сельской местности часто отсутствует система центрального отопления и горячего водоснабжения, поэтому население часто использует для нагрева воды электрические котлы [10]. Чтобы определить величину затрат электроэнергии на нагрев воды населением, проживающем в посёлке без системы горячего водоснабжения, и корректно выполнить моделирование энергопотребления для сельской местности, необходимо задать начальные параметры. Пусть начальная температура холодной воды – 10 °С, конечная температура нагретой воды – 40 °С, средний расход горячей воды на одного человека будет установлен на уровне 6 м³ в месяц. Количество сельских домохозяйств – 500. Среднее количество проживающих в каждом домохозяйстве – 3 человека. Исходя из того, что на нагрев 1 литра воды на 1 °С необходимо затратить 1.164 Вт·ч, величина расхода электроэнергии за месяц населённым пунктом, в котором проживают 1500 человек, будет равна 314 280 кВт·ч. Расход электроэнергии одним сельским домохозяйством, в котором проживают 3 человека, составит 628,56 кВт·ч в месяц.

На рис. 4 представлен результат моделирования энергопотребления населённого пункта, в котором отсутствует система центрального отопления и горячего водоснабжения. В синем и красном цвете приведены графики, представленные Иркутскими электрическими сетями для одного ввода ячейки, обслуживающей посёлок на 500 сельских домов и участков.

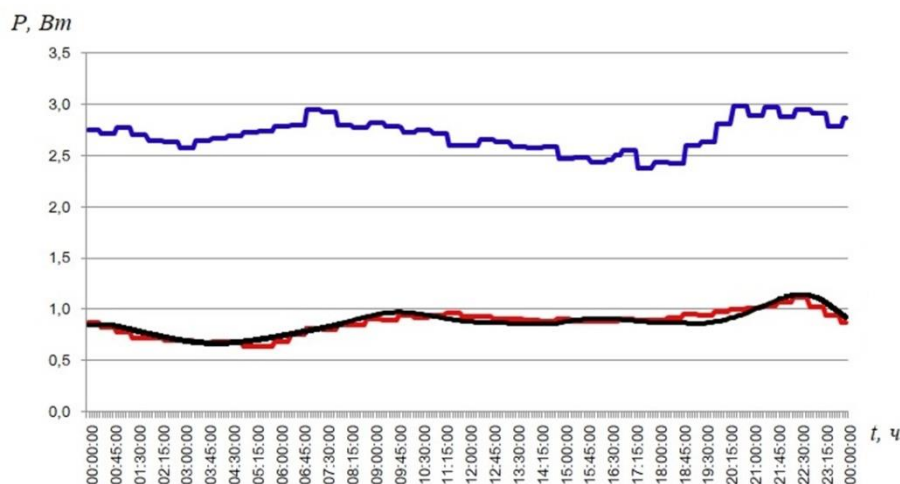


Рис. 4. Функция энергопотребления $F(t)$ для 500 сельских домохозяйств, в 21.3% из которых проживают неработающие пожилые люди, а в 78.7% – работающие люди, с учётом использования водонагревателей во всех домохозяйствах (черным); реальное энергопотребление поселка в самый холодный день апреля (синим) и в самый жаркий день июля (красным). Моделирование выполнено с использованием распределения Вейбулла, $\lambda = 2, k = 2$

Верхняя кривая, демонстрирующая уровень энергопотребления посёлка в самый холодный день апреля, исследована в статье [8]. Получено удовлетворительное совпадение имитационной модели с верхней кривой. В предыдущем варианте модели [8] не учитывался социальный слой пенсионеров, что не позволило добиться полноценного совпадения. Результат моделирования, представленный на рис. 4, демонстрирует более близкую к действительной величину утренних и вечерних пиков, в большей степени соответствует реальной динамике увеличения и снижения уровней энергопотребления населённого пункта. Лучший результат получен благодаря учёту различий в энергопотреблении между работающими и неработающими слоями населения, а также переносу части нагрузки, создаваемой электрическими котлами при нагреве воды, с ночного времени на другие периоды суток.

Заключение. В статье в единое целое объединена теория импульсов и теория свёрток (37). Теперь модель энергопотребления в жилом секторе имеет завершённый характер и учитывает не только одну случайную величину [7, 8], характеризующую момент возникновения импульса, но и его амплитуду и длительность. Вместе с тем, модель учитывает наличие пиков потребления для работающих и неработающих слоев населения, а также их отличия для этих категорий потребителей. Наличие пиков на графиках энергопотребления коммунально-бытовых потребителей подтверждается многочисленными соответствующими исследованиями [11-18].

Следует отметить, что при использовании данной модели могут учитываться и специфические особенности рассматриваемых потребителей или населённых пунктов, например, отсутствие систем центрального отопления или центрального водоснабжения. В данной статье приведён пример моделирования энергопотребления посёлка, в котором отсутствует система горячего водоснабжения. По мнению авторов, результат моделирования с достаточной степенью точности близок к реальной картине потребления электроэнергии, что подтверждает гибкость модели и возможность её применения к широкому кругу задач.

Список источников

1. Жежеленко И.В. Развитие методов расчета электрических нагрузок / И.В. Жежеленко, В.П. Степанов // Электричество, 1993. – № 2. – С. 1-9.
2. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения / Ю.А. Фокин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
3. Гнеденко Б.В. Теоретико-вероятностные основы статистического метода расчета электрических нагрузок промышленных предприятий / Б.В. Гнеденко // Изв. вузов СССР, сер. «Электромеханика», 1961. – № 1. – С. 90-99.
4. Тарнижевский М.В. Моделирование суточных графиков электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей методом ортогональных разложений / М.В. Тарнижевский, В.И. Михайлов // Электричество, 1985. – № 5. – С. 66-68.
5. Кузнецов Б.Ф. Построение стохастической модели бытовой нагрузки на примере водонагревателя / Б.Ф. Кузнецов, Ю.Ю. Клибанова, С.В. Сукьясов и др. // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2019. – № 5. – С. 958–966. – DOI: 10.21285/1814-3520-2019-5-958-966.
6. Доброго К.В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор - накопитель - потребитель» методом Монте-Карло / К.В. Доброго // Наука и техника, 2017. – № 2. – С. 160–170. – DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170.
7. Боровский А.В. Моделирование стохастической нагрузки в жилом секторе / А.В. Боровский, А.А. Юменчук // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2024. – № 2. – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1573> (дата обращения: 10.02.2025). – DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.034.
8. Боровский А.В. Модель стохастической электрической нагрузки в жилом секторе с использованием плотности вероятности Вейбулла / А.В. Боровский, А.А. Юменчук // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2024. – № 4. – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1755> (дата обращения: 10.02.2025). – DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.034.
9. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику / С.М. Рытов. – М.: Наука, 1976. – 494 с.
10. Юменчук А.А. Влияние электроотопления на прогнозные значения энергопотребления в жилом секторе / А.А. Юменчук // System analysis & mathematical modeling, 2024. – № 4. – С. 457-464.
11. Wijaya T., Ganu T., Chakraborty D. et al. Consumer segmentation and knowledge extraction from smart meter and survey data, SIAM International Conference on Data Mining (SDM14), 2014, pp. 226-234, DOI: 10.1137/1.9781611973440.26.
12. Carroll P., Murphy T., Hanley M. et al. Household classification using smart meter data, Journal of official statistics, 2018, no. 1, pp. 1-25, DOI: 10.1515/jos-2018-0001.
13. Figueiredo V., Rodrigues F., Vale Z. et al. An electric energy consumer characterization framework based on data mining techniques, IEEE Trans. Power Syst, 2005, no. 2, pp. 596-602, DOI: 10.1109/TPWRS.2005.846234.
14. Соловьева А.С. Сравнительный анализ зимних и летних графиков электрической нагрузки рабочих и выходных дней многоквартирных домов с электроплитами в системах электроснабжения крупных городов / А.С. Соловьева, Г.В. Шведов // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия: Энергетика, 2023. – № 1. – С. 27-37. – DOI: 10.14529/power230103.
15. Солуянов Ю.И. Исследование электрических нагрузок многоквартирных жилых комплексов в период распространения новой коронавирусной инфекции / Ю.И. Солуянов, А.И. Федотов, А.Р. Ахметшин и др. // Вопросы электротехнологии, 2021. – № 2. – С. 57-67.
16. Hussain M., Akram R., Memon Z. et al. Demand side management techniques for home energy management systems for smart cities. Sustainability, 2021, no. 21, DOI: 10.3390/su132111740.
17. Cortés-Cediel M., Cantador I., Bolívar M. Analyzing citizen participation and engagement in European smart cities. Social science computer review, 2021, no. 4, pp. 592-626, DOI: 10.1177/0894439319877478.
18. Mansouri M., Simab M., Bahmani B. Impact of Demand response on reliability enhancement in distribution networks. Sustainability, 2021, no. 23, DOI: 10.3390/su132313201.

Боровский Андрей Викторович. Доктор физико-математических наук, профессор, Байкальский государственный университет. AuthorID: 22229, SPIN: 7243-8706, ORCID: 0000-0003-2119-1072, andrei-borovskii@mail.ru, Россия, Иркутск, ул. Ленина, 11 к3.

Юменчук Андрей Анатольевич. Аспирант Байкальского государственного университета. AuthorID: 1127835, SPIN: 4752-7126, ORCID: 0009-0005-6754-1631, andrey.yumenchuk@mail.ru.

Theory of random electrical load pulses for the residential sector

Andrey V. Borovskiy, Andrey A. Yumenchuk

Baikal state university,

Russia, Irkutsk, *andrey.yumenchuk@mail.ru*

Abstract. The authors propose a method for simulating daily electrical load schedules in the residential sector based on the theory of random pulses combined with the convolution theory. The objective is to develop a model that takes into account both the random moment of pulse occurrence and its random duration and amplitude. Earlier models based on the convolution of the column-type energy consumption function described by the difference between two Heaviside functions with the probability density of the normal distribution for shifts in the time of switching on household appliances took into account only one random parameter. The fundamental difference of the model proposed in the article is that it takes into account three parameters characterizing each individual electrical load pulse. This allows, when simulating energy consumption of residential buildings, to obtain results that are much closer to the actual values of consumed power, and also to a greater extent correspond to the real dynamics of growth and decline in electricity consumption levels. The authors conduct a simulation modeling of the energy consumption of a small settlement and compare it with the actual energy consumption of a village of comparable size. The feasibility of applying the model to cases with special infrastructural conditions, such as the lack of central heating and water supply, is being tested. Among other things, the possibility of obtaining an optimal modeling result is being tested, taking into account different categories of consumers, such as working and non-working citizens. The possibility of transferring part of the load, which is not typical for night time, to other periods of the day, and the effect of transferring this load on the accuracy of the result are analyzed. Based on the results of the work, the advantages of the developed model are described and the conclusion is made about the possibility of its application in a wide range of tasks.

Keywords: stochastic energy consumption models, random pulses, theory of convolutions, simulation, daily energy consumption schedule

References

1. Zhezhelenko I.V., Stepanov V.P. Razvitie metodov rascheta elektricheskikh nagruzok [Development of methods for calculating electrical loads]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1993, no. 2, pp. 1-9.
2. Fokin Yu.A. Veroyatnostno-statisticheskie metody v raschetakh sistem elektrosnabzheniya [Probabilistic-statistical methods in calculations of power supply systems]. M.: Energoatomizdat [Moscow, Energoatomizdat], 1985, 240 p.
3. Gnedenko B.V. Teoretiko-veroyatnostnye osnovy statisticheskogo metoda rascheta elektricheskikh nagruzok promyshlennykh predpriyatiy [Theoretical and probabilistic foundations of the statistical method for calculating electrical loads of industrial enterprises]. *Izv. vuzov SSSR, ser. "Elektromekhanika"* [News of universities of the USSR, "Electromechanics"], 1961, no. 1, pp. 90-99.
4. Tarnizhevskiy M.V., Mikhaylov V.I. Modelirovanie sutochnykh grafikov elektricheskikh nagruzok kommunal'no-bytovykh potrebiteley metodom ortogonal'nykh razlozheniy [Simulation of daily load diagrams for communal and household consumers while using method of orthogonal decompositions]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1985, no. 5, pp. 66-68.
5. Kuznetsov B.F., Klibanova Yu.Yu., Suk'yasov S.V. et al. Postroenie stokhasticheskoy modeli bytovoy nagruzki na primere vodonagrevatelya [Building a stochastic model of residential load on example of a water heater]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk state technical university], 2019, no. 5, pp. 958-966, DOI: 10.21285/1814-3520-2019-5-958-966.
6. Dobrego K.V. Model' elektricheskoy nagruzki zhilishchno-kommunal'nogo ob'ekta dlya issledovaniya sistem "generator - nakopitel' - potrebitel'" metodom Monte-Karlo [Model for electric load of community housing projects to investigate "generator-accumulator-consumer" system while using Monte-Carlo method]. *Nauka i tekhnika* [Science and Technique], 2017, no. 2, pp 160-170, DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170.
7. Borovskiy A.V., Yumenchuk A.A. Modelirovanie stokhasticheskoy nagruzki v zhilom sektore [Stochastic load modeling in the residential sector]. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology], 2024, no. 2, available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1573> (accessed: 02/10/2025), DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.034.
8. Borovskiy A.V., Yumenchuk A.A. Model' stokhasticheskoy elektricheskoy nagruzki v zhilom sektore s ispol'zovaniem plotnosti veroyatnosti Veybulla [Model of stochastic electrical load in the residential sector using

- the Weibull probability density function]. Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii [Modeling, optimization and information technology], 2024, no. 4, available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1755> (accessed: 02/10/2025), DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.034.
9. Rytov S.M. Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku [Introduction to statistical radiophysics]. M.: Nauka [Moscow, Nauka], 1976, 494 p.
10. Yumenchuk A.A. Vliyaniye elektrootopleniya na prognoznnye znacheniya energopotrebleniya v zhilom sektore [Influence of electric heating on forecasted values of energy consumption in the residential sector]. System analysis & mathematical modeling, 2024, no. 4, pp. 457-464.
11. Wijaya T., Ganu T., Chakraborty D., et al. Consumer segmentation and knowledge extraction from smart meter and survey data, SIAM International Conference on Data Mining (SDM14), 2014, pp. 226-234, DOI: 10.1137/1.9781611973440.26.
12. Carroll P., Murphy T., Hanley M. et al. Household classification using smart meter data, Journal of official statistics, 2018, no. 1, pp. 1-25, DOI: 10.1515/jos-2018-0001.
13. Figueiredo V., Rodrigues F., Vale Z. et al. An electric energy consumer characterization framework based on data mining techniques, IEEE Trans. Power Syst, 2005, no. 2, pp. 596-602, DOI: 10.1109/TPWRS.2005.846234.
14. Solov'eva A.S., Shvedov G.V. Sravnitel'nyy analiz zimnikh i letnikh grafikov elektricheskoy nagruzki rabochikh i vykhodnykh dney mnogokvartirnykh domov s elektroplitami v sistemakh elektrosnabzheniya krupnykh gorodov [A comparative analysis of the electric load on weekdays and weekends of multi-apartment buildings with electric stoves in the power supply systems of large cities]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetika [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering], 2023, no. 1, pp. 27-37, DOI: 10.14529/power230103.
15. Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Soluyanov V.I. Issledovanie elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh kompleksov v period rasprostraneniya novoy koronavirusnoy infektsii [Analysis of electric loads in multi-apartment residential complexes during an outbreak of coronavirus disease]. Voprosy elektrotekhnologii [Electrical technology issues], 2021, no. 2, pp. 57-67.
16. Hussain M., Akram R., Memon Z. et al. Demand side management techniques for home energy management systems for smart cities. Sustainability, 2021, no. 21, DOI: 10.3390/su132111740.
17. Cortés-Cediel M., Cantador I., Bolívar M. Analyzing citizen participation and engagement in European smart cities. Social science computer review, 2021, no. 4, pp. 592-626, DOI: 10.1177/0894439319877478.
18. Mansouri M., Simab M., Bahmani B. Impact of Demand response on reliability enhancement in distribution networks. Sustainability, 2021, no. 23, DOI: 10.3390/su132313201.

Borovskiy Andrey Viktorovich. Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, Baikal State University. AuthorID: 22229, SPIN: 7243-8706, ORCID: 0000-0003-2119-1072, andrei-borovskii@mail.ru, Russia, Irkutsk, 11 k3 Lenina str.

Yumenchuk Andrey Anatol'evich. Postgraduate student of Baikal State University. AuthorID: 1127835, SPIN: 4752-7126, ORCID: 0009-0005-6754-1631, andrey.yumenchuk@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 12.02.2025; одобрена после рецензирования 27.02.2025; принята к публикации 02.04.2025.

The article was submitted 02/12/2025; approved after reviewing 02/27/2025; accepted for publication 04/02/2025.

Цифровая экономика и управление

УДК: 51–7:303.09

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.012

Представительские функции в системах организационного управления: концептуальная метамодель

Черкашин Александр Константинович

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,

Россия, Иркутск, *akcherk@irnok.net*

Аннотация. Проанализированы виды представительских функций управления общественной деятельностью в разных организационных масштабах, выделены их основные характеристики. Особенностью функционирования агентов в каналах взаимодействия автономных систем является относительная независимость их посреднической деятельности, высокая профессиональная подготовка и специализация. Представительские функции выражаются в представлении и защите прав и интересов доверителя преимущественно в форме координации действий, контроля и оперативного информирования. Имеет место заметное отчуждение прав и полномочий в пользу представителя согласно полученных директив, доверенностей и договоров. Представители заказчика имеют высокую свободу общения и делопроизводства, но они не могут вмешиваться в работу компаний-операторов. Представители улучшают взаимодействие юридического лица с клиентами или партнерами, позволяют эффективно решать задачи по месту и времени, обеспечивают их географическую и иерархическую близость. Проводимые представителем операции обычно имеют секретный характер, осуществляются с учетом создавшихся условий, с выбором путей рационального использования средств и ресурсов при выполнении директив. Достоинством этого звена управления является то, что на его функционирование не требуется высоких затрат на содержание. Построены концептуальные метамодели в номинации теории категорий в виде коммутативных диаграмм связи субъектов управления – стрелок морфизмов категорий. Дана обобщенная векторная интерпретация организационного поля взаимодействия и показано, что такой подход является сквозным, встречающимся в различных областях науки на разных уровнях иерархии систем. В таких метамоделях многочисленные классы агентов (адвокаты, лоббисты, риелторы), представляющие и защищающие права и интересы доверителей, заполняют пространство между институционно значимыми акторами, формируя организационно-правовое поле социального действия. Различаются разные уровни представительства в зависимости от степени отчуждения полномочий доверителей в пользу исполнителей.

Ключевые слова: организация управления, расслоение деятельности, уполномоченные представители, организационные поля, коммутативные диаграммы

Цитирование: Черкашин А.К. Представительские функции в системах организационного управления: концептуальная метамодель / А.К. Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2(38). – С. 140-157. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.012.

Введение. В системах организационного управления наблюдается двойственность участников деятельности, одна сторона которой обеспечивается личной вовлеченностью людей или организаций в принятие решений и их реализацию, а вторая – прослеживается в работе по их поручению, в выполнении представительских функций от имени своих доверителей. Это разделение проявляется в отчуждении (делегировании) прав и полномочий в пользу доверенного лица или фирмы, берущих на себя обязательства по обеспечению обусловленной деятельности в соответствии с принятыми инструктивными требованиями и заключенными договорами.

В российской и западной юридической теории и практике прослеживается сходное понимание представительских функций (*representative capacity*), к носителям которых относятся лица, действующие от имени другого физического или юридического лица с делегированными полномочиями: 1) от имени организации в качестве уполномоченного должностного лица, агента, партнера, доверенного лица или другого представителя; 2) в роли государственного служащего, личного представителя, опекуна или другого представителя в качестве, указанном в документах; 3) в качестве фактического поверенного доверителя; 4) в

любом другом случае в качестве уполномоченного представителя другого лица [1]. Например, в роли агента, действующего, как представитель принципала, юриста, представляющего клиента в суде, родителя, принимающего решения от имени своего ребенка. Важно, чтобы лицо, выступающее в качестве представителя, обладало необходимыми знаниями и навыками для принятия обоснованных решений и действий в наилучших интересах физического или юридического лица, которого оно представляет.

В более общем случае в вопросе представительства явно прослеживаются политические, правовые, информационные и коммуникационные аспекты управления ситуацией, а также территориальные особенности представительства, когда речь идет об обособленных структурных подразделениях юридического лица, автономно осуществляющих агентские и представительские функции в конкретном регионе или стране, что улучшает условия оперативного взаимодействия юридического лица с клиентами или партнерами для защиты его прав и интересов [2]. Возникает вопрос, является ли такое отчуждение формой иерархической или сетевой организации предприятия, или это реальное представление исходных прав и интересов специально уполномоченными лицами или группами лиц?

В научном плане эта тема мало исследована и концептуализирована в общественном знании. Существует множество исторических примеров и географических форм посредничества и представительства, функциональность которых обсуждается в разных публикациях [2-7]: свахи, ходоки, разного рода медиаторы, профсоюзы, адвокаты, риелторы, лоббисты, снабженцы, спарринг-партнёры, пиар-менеджеры, представители командования, послы, полномочные представители президента в федеральных округах и представители субъектов Российской Федерации в столице государства, представительные органы власти, общественные наблюдатели, государственные службы мониторинга за состоянием окружающей среды и т.д. В международной политике сформировалось суждение о прокси-войне (*англ. proxy* – полномочие) – опосредованной войне, войне по доверенности, войне чужими руками – международном конфликте между государствами, которые пытаются достичь своих целей с помощью военных действий на территории третьего государства. Такие войны снижают финансовые расходы и политические риски государств по сравнению с их прямым военным вмешательством, а также приводят к необходимости секретных операций [8].

Во всех перечисленных формах есть сходство и есть различие в понимании особенностей посреднического функционирования, передаваемого современным понятием «интерфейс», что в широком смысле означает определенную стандартами *границу* между взаимодействующими независимыми объектами или субъектами. Интерфейс задает параметры, процедуры и характеристики взаимодействия и обеспечивает само это взаимодействие в действительности. Простой и наглядный пример интерфейса – это соглашение, по которому во все времена обменивались информацией, например, посредством почтовых отправок документов на различных носителях.

В такой объективно сложившейся двойственной ситуации деятельности не вполне ясно, кто в системе решений является хозяином положения, самостоятельно действующим звеном управления (принципалом, главной и сильной стороной), а кто удаленно выполняет представительские функции и роли. Необходимо выяснить, что относится к этим функциям, какие разновидности данных функций существуют и как они реализуются в системах регулирования. Специальная задача – построить организационные метамодели общего вида и дать математическое толкование соответствующим терминам для объяснения специфических свойств реализации представительских функций управления.

1. Основные понятия и примеры применения. В экономически замкнутом натуральном хозяйстве человек, семья, род, местное население способны самостоятельно

решать многие текущие проблемы, удовлетворять собственные ограниченные потребности. В развитом обществе с товарным производством имеет место разделение труда, специализация деятельности, выраженная, например, в дифференциации отраслей производства и их размещения или в разграничении институтов государственного, регионального и муниципального управления. Необходимость подразделения хозяйства и общества на автономные системы обусловлена тем, что ни одна организационная структура не способна всегда и везде выполнять все виды работ и должна действовать в материальном и информационном взаимодействии с другими организациями, дополняя друг друга и обеспечивая в полном объеме производство востребованных товаров и услуг, разнообразие видов деятельности в коммуникационной сети координационного взаимодействия [9-10].

Пользуясь материалами из различных информационных источников, рассмотрим по отдельности виды представительских функций и путем их сравнительного анализа оценим различие и сходство подходов.

1.1. Аутсорсинг – организация деятельности компании, когда, в отличие от разового приобретения, производственного и конечного потребления товаров и услуг, предприятие-заказчик на основе длительного контракта передает функции по профессиональной поддержке бесперебойной работы предприятия другим операторам-исполнителям, что позволяет постоянно использовать внешние источники ресурсов и необходимые функции производственной деятельности иных специализированных компаний, таких, как ведение бухгалтерского учёта, обеспечение функционирования и безопасности офиса, транспортные и рекламные услуги, поддержка работы компьютерной сети, информационной инфраструктуры и др. [11]. В итоге осуществляется постоянный межотраслевой обмен продукцией предприятий и услугами компаний-подрядчиков, концентрирующихся на обеспечении деятельности конкретной организации-заказчика, передающей функции исполнения внешнему оператору. Попытки теоретического осмысления аутсорсинга столкнулись с противоречивой ситуацией – сложностью формализации факта, что, с одной стороны, исполнитель является внешним подразделением заказчика, а с другой, – независимой организацией [11]. Проблема решается, если в качестве заказчика выступает не сама заинтересованная компания, а ее самостоятельный представитель.

Связи обеспечиваются непосредственно участниками деятельности или опосредовано посредниками – разного рода агентами, которые на основании договоров с физическими или юридическими лицами представляют интересы последних во взаимоотношениях с контрагентами, заменяют их во многих жизненных, трудовых и правовых ситуациях. Таких агентов следует отличать от наемных сотрудников, работающих в составе организации и выполняющих порученную им функцию. Агенты-посредники – это особый самостоятельный и независимый вид деятельности, заменяющий по договоренности доверителя, выполняющий представительскую функцию, исполняющий соответствующую роль в других сферах деятельности, например, в рекламе и торговле товарами производителя. Сюда же относится профессия снабженца – представителя предприятия, который обеспечивает его работу и интересы на рынке, хорошо ориентируется в предложениях продавцов, рассчитывает объем закупки сырья и комплектующих. Агенты и представители действуют в правовом поле – системе правового регулирования, которая использует специальные юридические средства: правовые отношения, юридические нормы, правоприменительные акты, акты реализации прав и обязанностей субъектами права. В правовом поле заключается агентский договор, по которому одна сторона (агент) обязуется за вознаграждение совершать по поручению другой стороны (принципала) юридические и иные действия от своего имени, но за счёт главной стороны, либо от имени и за счёт главной стороны. В последнее время посредником

становится информационно-коммуникационная сеть Интернет, где можно прорекламировать свою компанию, выставить и купить необходимые товары и услуги по приемлемой цене.

Особенности этих связей хорошо иллюстрируются в различении организационных форм филиала и представительства компании. Филиалом является обособленное структурное подразделение юридического лица, расположенного вне места его расположения и осуществляющее все или часть его функций. Представительство – обособленное структурное подразделение юридического лица, реализующее агентские и представительские функции в конкретном регионе и осуществляющее защиту его прав и интересов. Обычно оно открывается для улучшения взаимодействия юридического лица с клиентами или партнерами. Филиал как часть компании обладает большими по сравнению с представительством правами [2].

Кратко рассмотрим несколько других геоисторических и правовых форм представительства и посредничества.

1.2. Сватовство – свадебный обряд, заключающийся в предложении женихом руки и сердца девушке в присутствии её родителей [12]. Будущий жених может участвовать в сватовстве либо сам, либо при посредничестве сватов, чтобы получить согласие родителей на брак. Сваха (сватья) – женщина, профессионально занимающаяся сватовством, устройством браков. Обычно свахи выполняли роль посредников за определённое вознаграждение. В ее обязанности входило не только сватовство, но нередко выбор невесты, сбор сведений о приданом, об облике и характере невесты. Сватовство – часто секретная операция, когда сваты стараются прийти в дом невесты незаметно для соседей, иногда в сумерках с сохранением в тайне факта и времени выезда, направления движения и места встречи.

1.3. Переселение – система государственных мероприятий по созданию условий для добровольного перемещения населения из постоянного места жительства на территории, подлежащие заселению и освоению. В 1896 г. в России официально установлен институт «ходочества» – обязательного заблаговременного отправления ходоков, которые подбирали и закрепляли свободную землю за своими доверителями [13]. С началом столыпинских земельных реформ ходоки начинают противопоставляться переселенцам. Ходоки – выборные на сельских сходах представители из наиболее авторитетных жителей, посылавшиеся из перенаселенных сельских местностей Европейской России для ознакомления с незаселёнными землями на Востоке страны. В случае договоренности между ходоком и местной администрацией, на новое место выезжала семья переселенца или целое крестьянское поселение.

П.А. Столыпин делал ставку на максимальную информированность ходоков и переселенцев со стороны государства. Проводился своеобразный государственный мониторинг всех аспектов переселения: выявление свободных и пригодных для заселения территорий, подготовки участков, количества переселяющихся, проблем и достижений при обустройстве крестьян на новом месте. Однако большинство переселенцев смутно представляли себе новые места, руководствовались слухами, письмами уехавших земляков, а также информацией от доверенных лиц – ходоков. Во многих случаях переселение в Сибирь шло без предварительного закрепления за собой земли. Роль неорганизованного ходочества была так велика, что некоторые регионы практически осваивались исключительно «неприписными» [13].

1.4. Ставка верховного главнокомандования (СВГК) – чрезвычайный орган высшего военного управления, осуществлявший стратегическое руководство советскими вооружёнными силами в годы Великой Отечественной войны. Главным рабочим органом СВГК был Генштаб Красной Армии. С весны 1942 г. появился новый орган стратегического управления – представители СВГК, назначаемые ею из числа наиболее подготовленных военачальников. Они обладали широкими полномочиями и направлялись обычно туда, где по

плану СВГК решались главные на данный момент задачи [14]. Представители СВГК, с одной стороны, принимали непосредственное участие в работе Ставки, постоянно находились в курсе основных военно-политических событий, хорошо знали стратегическую обстановку на фронте и намерения советского командования, а с другой, – в ходе подготовки операции принимали участие в заседаниях военных советов фронтов, присутствовали на занятиях командного состава, уточняли задачи войск на операцию, выбирали эффективные формы и способы ведения боевых действий с учетом конкретных условий обстановки, определяли пути рационального использования сил и средств, осуществляли контроль за выполнением приказов и директив СВГК [14].

Представители Ставки со своим небольшим рабочим аппаратом являлись временными органами оперативно-стратегического руководства, создаваемыми на период подготовки и проведения важнейших операций на стратегических направлениях. Важнейшим достоинством этого звена управления являлось то, что на его создание практически не требовались управленческие резервы и много времени. С помощью института своих представителей СВГК добивалась высокой оперативности руководства военными действиями, повышала эффективность управленческих процессов, осуществляла контроль за ходом выполнения стратегических и оперативных планов и оказывала своевременную помощь и поддержку войскам Действующей армии.

По характеру деятельности представители Ставки выступали, как промежуточные инстанции между Ставкой и фронтами, тем самым как бы приближая Ставку ВГК к фронту. Первоначально их пребывание на фронте было кратковременным. Вся деятельность представителей носила в основном информационный характер. Представительство Ставки ВГК по своему составу, правовым возможностям и функциональным обязанностям было неодинаковым. Полномочными представителями являлись члены Ставки; остальные лица выполняли эту роль как ее уполномоченные. Разница заключалась в том, что первые действовали от имени Ставки ВГК, а вторые – на основании ее полномочий. В процессе «координации действий» и «руководства операциями» представители направляли основные усилия фронтов на достижение главных целей операции. Особенностью работы представителей Ставки ВГК было то, что они, как правило, не отдавали письменных приказов, директив и других боевых документов фронтам (армиям), но все их рекомендации носили распорядительный характер вышестоящей инстанции и являлись обязательными для исполнения нижестоящими. Часто по результатам докладов и предложений своих представителей Ставка отдавала соответствующие приказы или директивы непосредственно фронтам и тем самым как бы санкционировала их деятельность. Представители вместе с командующими и военными советами фронтов несли полную ответственность перед СВГК за результаты боевой деятельности войск в проводимых операциях [14].

1.5. Посол – дипломатический представитель высшего ранга своего государства в иностранном государстве или в международной организации, официальный представитель руководства своей страны. Задачей и функцией посла является представление и защита интересов государства и государственного руководства. Для выполнения своих функций посол имеет право отношений с государственными органами страны пребывания, а также с местной политической оппозицией и общественно-политическими организациями. Территория посольства пользуется экстерриториальным иммунитетом. Послы назначаются главами государств и представляют их за рубежом, но одновременно подчиняются исполнительным органам - министерствам иностранных дел в составе правительств. По приезде в страну пребывания послы вручают верительные грамоты и аккредитуются при главе государства, после чего считаются вступившими в должность. Обмен дипломатическими представительствами между государствами возможен на одном из трех уровней: посольство,

во главе которого дипломатический представитель, имеющий класс посла; миссия, возглавляемая посланником; миссия, возглавляемая поверенным в делах. В стране пребывания и аккредитации послы всех государств объединены в неформальную организацию – дипломатический корпус, который осуществляет исключительно церемониальные функции, не имеет статуса политической организации и юридического лица.

1.6. Полномочный представитель президента Российской Федерации (РФ) в федеральном округе (ФО) – должностное лицо, назначаемое президентом РФ, представляет президента в пределах ФО, обеспечивает реализацию конституционных полномочий главы государства на территории ФО. Полномочный представитель является федеральным государственным служащим и входит в состав Администрации президента (АП), непосредственно подчиняется президенту и подотчетен ему. Полномочный представитель при исполнении должностных обязанностей имеет право беспрепятственного доступа в любые организации, находящиеся в пределах соответствующего ФО. Координацию деятельности полномочного представителя осуществляет руководитель АП РФ. Полномочный представитель для решения возложенных на него основных задач в ФО: обеспечивает координацию деятельности федеральных органов исполнительной власти; анализирует эффективность деятельности правоохранительных органов; вносит президенту РФ предложения; организует взаимодействие федеральных органов исполнительной власти с органами государственной власти субъектов РФ, органами местного самоуправления, политическими партиями, иными общественными и религиозными объединениями. В отличие от представителей Ставки ВГК представители президента работают на постоянной основе в географическом и административном центре территории ФО, являются самостоятельным подразделением АП РФ, действующим в пределах своей компетенции. Аппарат полномочного представителя выступает в качестве промежуточной инстанции между президентом и субъектами РФ, приближая АП к органам управления и населению ФО. Выполняя функции координации действий, контроля и оперативного информирования, представители президента не обладают властными полномочиями для изменения ситуации, и о результатах их работы мало что известно. По функциям они отличаются от председателей совнархозов советского времени, созданных для территориального управления народным хозяйством и наделенных широкими полномочиями, обеспечивающими децентрализацию руководства страной, приближение руководства промышленностью и строительством к низовым звеньям экономической системы, обеспечения комплексного подхода к развитию территорий. Курс руководства СССР на централизацию государственного управления заставил отказаться от территориальной системы управления промышленностью и вернуться к отраслевой системе управления [15].

1.7. Помощник Президента РФ – должность в АП РФ, выполняющий важные функции по подготовке предложений президенту по реализации его полномочий, аналитических, справочных, информационных материалов, по перспективным и текущим планам работы, проектов поручений президента РФ и т.д. Помощники исполняют поручения президента в составе АП главы государства, высшего руководства страны. Кроме того, существует самостоятельный институт исполнительной власти: правительство – федеральный исполнительный орган государственной власти РФ, подотчётный президенту РФ и подконтрольный Государственной думе. В президентских республиках президент является единоличным носителем правительственной власти. Аналогично разного рода исполнители, как представители руководителя организации в разных сферах, действуют по воле и поручению главы организации и объединяются в различные формы управления на уровне государственной и региональной власти, производств и общественных образований в рамках,

установленных для таких автономных систем организационных полномочий. Этим они отличаются от внешних независимых представителей-посредников.

1.8. Представительства субъектов РФ – представительства администраций краёв и областей при правительстве РФ. Представительство возглавляется представителем исполнительной власти обычно в ранге заместителя главы правительства субъекта. Он содействует учету интересов субъекта при решении вопросов в федеральных органах, укрепляет контакты субъекта с федеральными органами и их подразделениями, оказывает помощь должностным лицам субъекта при решении ими служебных вопросов в столице, распространяет информацию о положении дел в субъекте, содействует организации исследований. Представительство субъекта оказывает помощь исполнительной и законодательной власти региона в продвижении и осуществлении своей деятельности, т.е., кроме прочего, выполняет лоббистские функции.

1.9. Лоббизм – вид деятельности, заключающийся в законном воздействии физических лиц и представителей государственных и негосударственных организаций на международные организации и объединения, органы государственной власти или местного самоуправления с целью добиться принятия или непринятия ими определённых решений. Причем лоббизм является не институтом политической системы, а скорее, составной частью особого механизма (процесса, явления) артикуляции интересов [16]. Лоббизм также проявляется, как форма коррупции, когда частный интерес может быть реализован в ущерб общественному. Лоббист не состоит на службе в органе, который вправе принять или не принять нужное решение. В России такого рода деятельность юридически не регламентирована. В проектах российских законов в этой области и в законах США раскрываются особенности правового регулирования лоббизма [17].

У компании, которая хочет продвинуть или изменить тот или иной закон, есть две возможности: создать внутри компании специальный отдел или обратиться к профессиональному посреднику. В первом случае компания обязана сама зарегистрироваться в качестве лоббиста, указать конкретную цель лоббизма, обозначить расходы на эту деятельность, перечислить сотрудников администрации, с которыми будут вестись контакты. Если компания нанимает посредника, он также должен зарегистрироваться, как лоббист конкретной цели (указать компанию как своего клиента) и опубликовать все расходы на ее достижение.

В России лоббизм – широко распространенное явление. Лоббизм рассматривается, как организация, позволяющая различным социальным группам сформировать конструктивный и взаимовыгодный диалог с властью [7]. В России лоббированием в государственных органах занимаются общественные организации, объединяющие предпринимателей, а также профсоюзные объединения, формально обладающие специальными правами по лоббированию, но слабо использующие эту возможность.

1.10. Профессиональный союз (профсоюз) – добровольное общественное объединение людей, связанных общими интересами по роду их деятельности. Они создаются с целью широкого представительства и защиты прав наёмных работников и их коллективов в трудовых отношениях, а также защиты социально-экономических прав и интересов членов организации, обычно зафиксированных в коллективных договорах работников с работодателем. Профсоюзные организации могут объединяться на индустриальных, национальных, региональных и международных уровнях. Профессиональные союзы являются отдельным видом общественных объединений, особенности создания, деятельности, реорганизации и ликвидации которых регулируются Федеральным законом.

Как добровольные ассоциации, независимые профсоюзы разрабатывают свои правила, обычно в форме устава, существуют на взносы (пожертвования) своих членов. Независимые

профсоюзы могут возникать лишь при наличии рынка труда. Членом таких профсоюзов не может быть работодатель, но с другой стороны, не допускается вмешательство профсоюзов в хозяйственную работу предприятий, в управление производством. В России действовали предпринимательские псевдопрофсоюзы, которые пользовались профсоюзным законодательством для защиты прав предпринимателей от государственного давления и получения сверхприбыли [18]. Одна из особенностей профсоюзной работы в борьбе за права трудящихся – организация забастовок – коллективного прекращения работы на предприятии с целью добиться от работодателя или правительства выполнения своих требований. Это один из способов мирного разрешения трудовых споров в основном с целью повышения заработной платы и улучшения условий труда.

1.11. Риелторы – агенты по недвижимости, индивидуальные предприниматели, специализирующиеся на решении вопросов рыночного оборота недвижимости путём организации поиска продавца или покупателя, обеспечения юридической «чистоты» сделок, организации процесса заключения сделок купли-продажи, аренды недвижимости от лица собственника или пользователя. В более широком понимании это маклеры – торговые посредники, профессионально занимающиеся посредничеством при покупке и продаже товаров, ценных бумаг, услуг, страховании. Они способствуют заключению сделок купли-продажи путём сведения партнёров и получают вознаграждение, как правило, от каждой из сторон.

1.12. Адвокаты помимо оказания квалифицированной юридической помощи физическим и юридическим лицам, защищают их права и представляют их интересы в органах власти, собирают сведения, необходимые для оказания помощи. По закону адвокат не может состоять на службе или заниматься предпринимательской и иной деятельностью, кроме общественной, творческой, научной и преподавательской, чтобы сохранять свою функциональную независимость. Адвокат не вправе занимать по делу позицию вопреки воле доверителя. Организации решают, содержать ли собственный штат юристов или нанимать сторонних адвокатов. Адвокат принадлежит к людям свободной профессии, имеет специальный статус, полученный в установленном законом порядке. Адвокаты объединяются в коллегии адвокатов, адвокатские бюро, юридические консультации, либо осуществляют адвокатскую деятельность индивидуально, учредив адвокатский кабинет. Любой юрист или адвокат считается поверенным, а их клиенты – доверителями. Согласно ГК РФ, поверенный обязан лично исполнять данное ему поручение, сообщать доверителю информацию о ходе исполнения поручения, передавать доверителю всё полученное по сделкам. Вся ответственность за результаты действия поверенного (подписанные документы, заключённые сделки) лежит на доверителе. Наглядным примером может служить участие адвокатов и других представителей самоуправляющихся профессий в разных видах судопроизводства [19].

1.13. Уполномоченные представители – должностные лица и представители юридического лица, которые в соответствии с учредительными документами организации вправе действовать от имени данного юридического лица без доверенности, а также лица, уполномоченные зарегистрированным лицом совершать действия с ценными бумагами от его имени на основании доверенности, а также законные представители зарегистрированного лица (родители и др.). В первом случае такими представителями могут быть не только руководители или иные лица, уполномоченные учредительными документами, но и другие штатные работники, во втором – в том числе приглашенные со стороны. Официально уполномоченными лицами юридических лиц на основании закона или учредительных документов выступают их исполнительные органы: директор, руководитель и коллегиальные

органы – правление, дирекция, совет директоров и т.д. В учредительных документах организации должно быть указано такое лицо (орган), а также определен круг его полномочий.

1.14. Представительная власть – совокупность полномочий, делегированных народом выборным представителям, объединенным в специальном коллегиальном учреждении (парламенте, муниципальном совете) на строго определенный срок, а также совокупность самих представительных органов власти [20]. Народное представительство – система власти народа, осуществляемой через выборных представителей, в пользу которых делегируются исключительные властные права, реализация которых в итоге сказывается на жизни населения, в силу чего избиратели несут ответственность за свой демократический выбор. Дума или совет депутатов муниципального образования (МО) – выборный орган местного самоуправления, обладающий правом представлять интересы населения и принимать от его имени решения, действующие на территории МО. Через МО каждый гражданин РФ может реализовать своё конституционное право на осуществление власти на уровне местного самоуправления. Региональный парламент – это политический институт, главными задачами которого являются широкое представительство общественных интересов, реализация которых осуществляется путем принятия решений, имеющих законодательный характер, а также институт, обеспечивающий общественный контроль за деятельностью исполнительной власти, и, в особенности, за порядком расходования бюджетных средств.

Эффективный и авторитетный представительный орган власти формируется на основе конкурентного избирательного процесса при участии различных политических сил – политических партий и общественных движений. Избранные представители народа объединяются в самостоятельные и независимо действующие институциональные структуры государственного и местного самоуправления; тем они отличаются от представителей-исполнителей, выполняющие свои обязанности по поручению.

Опосредующим звеном между народом и высшими органами государственной власти являются выборы, организуемые избирательными комиссиями – независимыми коллегиальными органами, формируемыми в соответствии с законодательством и обеспечивающими подготовку и проведение, согласование, проверку и публикацию результатов выборов различного уровня. Комиссии формируются из представителей власти и общественности и действуют на постоянной или временной основе. Процедура свободных выборов – своеобразный информационный процесс законного утверждения народом избранных кандидатов в должности на конкурентной основе [21].

2. Особенности представительских и посреднических функций. Приведенные примеры демонстрируют разные формы и уровни исполнения представительских функций согласно установленным полномочиям – правам юридического или физического лица на совершение хозяйственных операций, а также на представительские функции, зафиксированные законодательно или нотариально. Этот опыт, безусловно, необходимо систематизировать и использовать. Любой руководитель организации в силу занимаемого положения и обозначенных полномочий выполняет различные представительские функции [3]. В этом качестве он принимает решения, участвует в различных совещаниях, конференциях и иных общественных мероприятиях, в работе выборных местных и центральных органов. В результате общения с трудовым коллективом и внешним окружением он получает информацию, применение которой позволяет влиять на производственный климат и хозяйственную деятельность коллектива [22]. При необходимости руководитель передает часть функций своим заместителям, помощникам, советникам, другим представителям – поверенным или доверенным лицам, в том числе не находящимся на службе, а также исполнителям других организаций. По глубине делегирования выделяются четыре уровня доверительных отношений по принципу: лучше сделай сам, или поручи другому, закажи у

третьего или приобрести у четвертого. Здесь внимание обращаем на третий представительский уровень, где устанавливаются информационные и материальные каналы удаленной коммуникации с географическим, социально-экономическим и политическим окружением, полезные для осуществления уставной деятельности. Самостоятельной проблемой становится выбор посредников по ординалистской или кардиналистской оценке вариантов предложений.

Представительские и посреднические функции подразделяются по степени отчуждения полномочий управления: руководитель – заместитель – исполнитель – представитель – посредник (медиатор) – производитель. Медиатор в социально-политической сфере – это независимый посредник, которого привлекают для урегулирования споров или конфликтов, например, в международных спорах, в дипломатических отношениях, торговых сделках. В идеальном случае медиатор не является представителем ни одной из сторон. Вместе с тем он должен получить признание, быть призван и поддержан контрагентами в своих действиях, получить право доносить свою позицию до оппонентов. Его деятельность напоминает передачу различных усилий (сцепления) в технических и других сложных системах.

Общей особенностью функционирования агентов в каналах взаимодействия автономных систем является относительная независимость их посреднической деятельности, высокая профессиональная подготовка в узкоспециальной области (специализация), умение решать сложные задачи управления, способность наводить связи и общаться со специалистами нужных организаций. Агенты не могут состоять на службе или работать в коллективах компаний, но свой доход получают в виде вознаграждения и от заказчика, и от исполнителя. Представительские задачи и функции выражаются в представлении и защите прав и интересов доверителя преимущественно в форме координации действий, контроля и оперативного информирования. Представители заказчика имеют высокую свободу общения и делопроизводства, доступа к информационным источникам, но они не могут вмешиваться в работу компаний-операторов. Имеет место заметное отчуждение прав и полномочий в пользу представителя согласно полученных директив, доверенностей и договоров. Вместе с тем решение доверенного лица-представителя должно согласовываться и одобряться доверителем, поскольку ответственность за итоговые результаты полностью лежат на доверителе. Промежуточные инстанции – представители заказчика – улучшают взаимодействие юридического лица с клиентами или партнерами, позволяют эффективно решать главные задачи по месту и времени, как бы обеспечивают их географическую и иерархическую близость. Проводимые представителем операции обычно имеют секретный характер, осуществляются с учетом создавшихся условий, с выбором путей рационального использования средств и ресурсов при выполнении директив. Достоинством этого звена управления является то, что на его функционирование не требуется высоких затрат на содержание, но не исключено привлечение резервов доверителя для достижения поставленной им цели. Агенты объединяются в неформальные (ассоциации) и формальные (институты) организации. Представители, как правило, не являются самостоятельным институтом хозяйственной или политической системы, а скорее той ее частью, которая увязывает эту систему в единое целое.

3. Организационная метамодель. Наличие общих черт реализации посреднических функций предполагает существование метамodelей организационной деятельности, построенной по сквозным принципам общественной организации в единых терминах описания связей самостоятельных институтов управления. Метамодель – это модель модели [23], типовая (суррогатная, эталонная) модель, то есть образец и языковые средства построения модели определенной предметной области, например, (интер)теория с набором специфических понятий, правил, ограничений, применимых однообразно для моделирования специального класса задач в природе, обществе и на производстве. Метамодели бывают разных типов и имеют разнообразное применение в разработке программного обеспечения и

системной инженерии. На следующем метатеоретическом уровне разрабатываются средства метамоделирования: правил создания интертеорий и соответствующих метамоделей типа метафилософии, трансцендентальной аналитики – феноменологии и герменевтики [24]. Так в полном объеме изучаются общие правила преобразования $f(y): F(x_0) \rightarrow F(x)$ входных $F(x_0)$ сигналов в выходные $F(x)$ в терминологии соответствующих метамоделей. Здесь $F(x)$, $F(x_0)$ – системные функции значений многих переменных $x = \{x_i\}$ и $x_0 = \{x_{0i}\}$; $f(y)$ – представительская функция преобразования относительных переменных $y = x - x_0$.

Метатеоретический уровень представлен тремя секторами метамоделирования: концептуальным, эмпирическим и математическим [25]. В соответствии с этим разделением мета модель может быть отображена схемой-графом, набором входных и расчетных данных, формулами и алгоритмами вычислений; между мета моделями разных секторов устанавливается однозначное соответствие: уравнения могут быть построены по концептуальной схеме (онтологии), а данные обработаны и рассчитаны по формулам. Специальная исследовательская задача – установление этого соответствия. Формальный анализ организационной деятельности концептуально удобно проводить с помощью коммутативных диаграмм теории категорий, связывающих объекты $F(x_0) \rightarrow F(x)$ через морфизмы-отображения $f(y)$ в виде формальных категорий, функторов и топосов, а потом переводить их в аналитические соотношения [26].

Сквозной характер всякой интертеории позволяет применять одинаковые мета модели полей взаимодействия для описания живых и неживых объектов, социальных и экономических систем.

Так, в современной физике выделяют фундаментальные поля, которые составляют основу физической картины мира. Четыре известных физических поля проявляют себя как посредники при взаимодействии заряженных частиц (тел). При этом интенсивность (сила) взаимодействия определяется особенностью положения и законами движения тел, а также их зарядами, которые в организационно-правовом поле соответствуют правам и интересам доверителя, его полномочиям и функциям. Фундаментальные квантовые поля обладают практически всеми атрибутами физической реальности, включая способность переносить энергию и импульс. Вся материя описывается такими полями. Возбуждениями фундаментальных полей являются элементарные частицы-переносчики взаимодействия: фотоны, векторные бозоны, глюоны и т.д.

В физической химии исследуется ковалентная химическая связь, образованная перекрытием пары валентных (на внешней оболочке атома) электронных облаков атомов, из которых состоят молекулы. Характерные свойства ковалентной связи – направленность, насыщенность, полярность, поляризуемость – определяют физические и химические свойства соединений. Электроны тем подвижнее, чем дальше они находятся от ядер. В итоге оказывается, что физическая картина мира может быть сведена к квантованным полям и их взаимодействию.

Упомянутые физические модели – это аналоги организации общественных систем (молекул управления) через частных посредников. Подчеркивается наличие специфических характеристик соответствующих организационных полей, перечисленных в конце предыдущего раздела. Существуют поля различных систем: клеточное поле органических тканей, биологические поля организмов, биотические поля растительных ассоциаций, географические поля ландшафтов и др. Посредники в разнообразных полевых взаимодействиях называются медиаторами. Нейронные поля (сети) обеспечиваются биологически активным веществом, осуществляющим перенос возбуждения с нервного окончания на рабочий орган и с одной нервной клетки на другую. Для ускорения химических

процессов используются катализаторы – химические вещества, которые, вступая во взаимодействие с исходными реагентами, сами не расходуются в процессе реакции. В гетерогенном катализе катализаторы иногда называют контактами, что подчеркивает их системообразующую роль в создании новых соединений атомов и молекул. Единство географических полей обеспечивается направленным перемещением вещества, энергии и информации. Важной особенностью элементов свободного представительства является то, что они не расходуются, сохраняются, могут связывать разные объекты, как адвокаты, менять в зависимости от обстоятельств своего доверителя, но не должны *одновременно* представлять интересы разных физических или юридических лиц. Их позиция фиксируется в структуре регулирования, так что, находясь в одной позиции отношений, они не могут находиться ни в какой иной. Одну доверительную позицию не могут занимать разные агенты, конкурирующие между собой.

Наглядной иллюстрацией полевого взаимодействия является командная игра в футбол, тактика которой состоит в отборе мяча у противника, обработке и ведение мяча, передаче мяча пасами партнерам и ударами по воротам противника. Футболисты, по правилам игры, напрямую не должны контактировать между собой – мяч выступает в качестве их посредника, когда точность передач и ударов становится залогом успеха в игре. Этим футбол отличается от спортивных единоборств, например, бокса, чем демонстрирует идеальный образец организационных отношений и процессов. Подобием такого процесса являются документооборот и технология исполнения устных и письменных распоряжений в последовательности операций для достижения цели управления.

4. Концептуальная метамодель организационного поля. Ранее была предложена сетевая модель периодической полисистемы общественных и государственных институтов регулирования ситуации в стране, что реализует принципы расслоения деятельности на самостоятельные блоки (слои, акторы, институты), каждый из которых независимо осуществляет специальную функцию (институциональный дискурс, функциональность) управления и организационно взаимодействует с другими блоками по принципам отображения результатов деятельности, добавляя собственные решения к полученным извне сигналам для обязательного исполнения [9-10]. Отношения формально и неформально организованных блоков задаются абстрактными стрелками воздействия, в результате чего модель пространства управления может рассматриваться в качестве правового векторного поля действия без обратных связей с сетевой структурой, что описывается в виде коммутативных диаграмм (ориентированных графов и математических категорий) (рис.1). Представители-посредники формально соответствуют таким стрелкам-векторам поля территориально-организационного управления. Как уполномоченные агенты разного рода, они независимо «вращаются» между акторами, увязывая блоки-подсистемы в единую координационную полисистему.

Абстрактная сетевая модель создается в виде блок-схемы – коммутативной диаграммы, где объектами (блоками) считаются автономные подсистемы-слои взаимодействия (частицы, атомы, элементы сети, общественные и государственные институты), а стрелками – морфизмы отображения функции одного слоя в функцию другого (рис.1). Простейшее бинарное отношение-воздействие (рис.1а) передает однонаправленное влияние или информационный сигнал с одного блока системы на другой. Состояние системы задается организационной функцией $F(x)$ многих переменных $x=\{x_i\}$, а ее изменение – стрелкой локальной функции изменений $f(y)$: $f(y)=F(x)-F(x_0)$. Длина стрелки λ отражает степень предпочтения и вовлеченности, независимости реализации представительской функции от заказчика: $\lambda=0$ – функция руководителя, $\lambda=1$ – функция исполнителя. В первом случае руководитель

непосредственно общается по делу с другой организацией, а во втором – поручает эту функцию полномочному представителю. Пример – истец в суде самостоятельно отстаивает свои права и интересы $F(x_0)$ или поручает своему адвокату выполнить эти действия $f(y)$ с получением судебного решения $F(x)=F(x_0)+f(y)$.

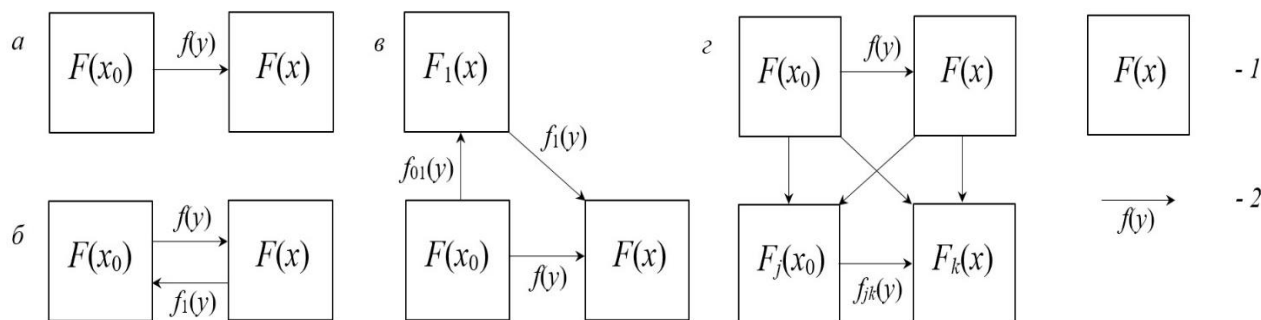


Рис.1. Коммутативные диаграммы организационных систем разной сложности: а) однонаправленная парная связь; б) обратная связь; в) треугольная коммутативная связь; г) сетевая командная связь четырех участников. Условные обозначения: 1 – автономные блоки-слои полисистемы с указанием организационной функции $F(x)$ многих переменных $x=\{x_i\}$; 2 – стрелки, соответствующие воздействию на смежные блоки, с указанием его локальной функции-вектора связи $f(y)$

В системе с обратной связью (рис.1б) процесс стабилизируется при отрицательном воздействии и порождает конфликт интересов при положительных влияниях. Схема моделирует межличностные, боевые, консультативные, рыночные, коррупционные и иные простые взаимодействия. В них важно договориться, достигнуть компромиссных решений, баланса сил и отношений, в идеале признать за собой позиции зависимого или независимого блока (рис.1а), например, перейти от однократных рыночных цен к длительным договорным, как бывает в случае аутсорсинга. Здесь можно воспользоваться услугами медиаторов-посредников. Еще лучше принять во внимание третий координирующий элемент (рис.1в), позволяющий разрешить конфликт интересов. Триада связи независимых блоков в виде коммутативной диаграммы организует базовую ячейку сети регулирования [9-10]. Например, триада разделенных и независимых органов власти: законодательной $F(x_0)$, судебной $F_1(x)$ и исполнительной $F(x)$. При этом принимается (по стрелкам), что принятые законы $F(x_0)$ обязательны к исполнению всеми органами власти и общественными организациями на всех территориальных уровнях. То же касается исполнения судебных решений $F_1(x)$. Коммутативность связей выражается в том, что результат $F(x)$ не зависит от последовательности (суперпозиции) реализации функций исполнения $f=f_{01}\circ f_1: F(x_0)\rightarrow F(x)$, что естественным образом обеспечивает контроль в управлении.

Схема (рис.1в) отражает структуру агентского договора, что используется организациями и предпринимателями $F(x_0)$ для оформления сотрудничества с третьими лицами $F(x)$, когда $f:F(x_0)\rightarrow F(x)$. По такому договору для выполнения работ привлекают исполнителей $F_1(x)$: $f=f_{01}\circ f_1$. В качестве предмета этого договора выступают действия f_1 , которые исполнитель обязуется совершить в пользу принципала $F(x_0)$, а принципал обязуется предоставить f_{01} ему нужные для выполнения его функций f_1 ресурсы и полномочия, а также оплатить вознаграждение. В договоре учитываются также условия, на которых стороны принимают на себя обязательства. Выгода работы по таким договорам определяется тем, что стрелки действий однонаправленные, например, исполнитель при распространении товаров принципала не принимает их на свой баланс, а сразу передает конечному потребителю. С другой стороны, произведенные исполнителем товары и услуги принципал не возвращает себе – исполнитель напрямую их отдает потребителю (третьему лицу). В итоге действие

осуществляется без обратной связи, что экономит ресурсы и время, делает процесс управления ситуацией более прозрачным. По схеме (рис.1б) принципал $F(x_0)$ выполняет также координирующую функцию доведения заказа по цепочке действий $f=f_{01} \circ f_1$ до потребителя $F(x)$. При нарушении договорных обязательств к сторонам могут применяться финансовые и другие санкции. Агентский договор – это договор поручения, если агент выступает от имени принципала, или договор комиссии, если предусматривается выполнение агентом самостоятельных действий от своего имени. В первом случае действие агента соответствует стрелке f представительских функций, во втором – блоку $F_1(x)$ исполнения порученных работ.

Добавление новых независимых блоков к коммутативным структурам разнообразит и усложняет сетевую метамодель (рис.1б) управления, в которой блоки $F_j(x)$ погружены в векторное поле агентской деятельности $f_{jk}:F_j(x) \rightarrow F_k(x)$, порождающей систему взаимодействия автономных частей (организацию). Для перехода от концептуальных моделей к расчетным необходимо вместо общих соотношений рассматривать конкретные аналитические зависимости-функции, для чего используются идеи дифференциальной геометрии [25] для расслоения реальности на многообразиях связей показателей x состояния блоков. В математических и информационных технологиях это реализуется в моделях конечных автоматов, при моделировании самоорганизации динамических систем, в том числе с использованием структурных уравнений, отражающих стрелки диаграмм причинно-следственных связей между скрытыми переменными, в процедурах метамоделирования разной прикладной направленности с применением программного обеспечения, поддерживающего любые нотации моделирования, когда на основе одной метамодели создается множество моделей разных объектов.

Заключение. Исполнение представительских функций – важнейшее качество для объединения системы общественных и государственных институтов в организационную систему (поле) территориального управления. На схемах организации их теневое функциональное действие отображается направленными стрелками-векторами передачи материального или информационного сигнала от блока к блоку самостоятельно или с привлечением агентов влияния, в разной степени проявляющих себя согласно содержанию агентского договора с заказчиком. Различного рода агенты, представляющие и защищающие права и интересы доверителя, заполняют пространство между институциональными акторами, формируя правовое организационное поле действия по закону. Представительство, с одной стороны, это своеобразная болезнь, связанная с неспособностью решать проблемы собственными средствами. Возможные симптомы этой «болезни» – рост числа посредников и объемов денежных средств, направляемых на реализацию соответствующих функций. С другой стороны, услуги посредников обеспечивают свободу разнообразных видов деятельности, ее целенаправленность, эффективность и результативность, снимая с них обременения неспецифической работы. Разнообразие представительских функций отражается в метамоделях в виде коммутативных диаграмм связи объектов и их стрелок-отображений (морфизмов) в нотации теории категорий. В частности, связь населения и органов управления устанавливается по итогам выборов, через опосредованную направленную на результат деятельность избирательных комиссий.

Дополнительные уточняющие и объясняющие возможности появляются при использовании процедуры расслоения на многообразиях, отображающие функции состояния организации на входе и выходе и универсальную функцию действия по исполнению доверительных поручений. Последняя, представительская функция естественным образом формирует векторное поле деятельности в виде связности изолированных частей расслоенного пространства (полисистемы слоев). Такие фундаментальные поля встречаются

в живой и неживой природе и в человеческом обществе, поэтому метод расслоения – это сквозной, интертеоретический подход к исследованию сложных систем-комплексов, что позволяет применять разработки в этой области в разных науках и практиках.

Обычно исполнитель по договорам является внешним подразделением заказчика, а с другой стороны, – независимым актором. Такая двойственность деятельности, отраженная в организационных моделях, объясняется свойствами понимаемых в обобщенном смысле векторов – операторов, имеющих начало и конец: начало соответствует элементам (центрам, слоям, категорным объектам) многообразия системных связей, конец – действию представительских функций. Подобная организация исключает непосредственный контакт (пересечение интересов и правовых полномочий) и демонстрирует идеальную форму медиации, обеспечивающей свободу, суверенитет и независимость главных сторон в коллективном процессе. В итоге формируется организационное поле с расслоенной структурой из разных сообществ.

В дальнейшем необходимо переходить от метамоделей общего вида к количественным моделям, позволяющим проводить расчеты. Организационные метамоделю имеют реализацию в различных областях науки. Это позволяет использовать их опыт моделирования для создания цифровых моделей работы общественных организаций и институтов власти, в частности, с применением операций расслоения из дифференциальной геометрии и топологии, что будет показано в статье в следующем номере журнала.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств государственного задания (номер госрегистрации темы АААА-А21-121012190056-4).

Список источников

1. Representative capacity. LSdefine, Simple English definitions for legal terms, available at: <https://www.lsd.law/define/representative-capacity> (accessed: 11/28/2024).
2. Гительман Л.Д. Энергетический бизнес / Л.Д. Гительман, Б.Е. Ратников, 2006. – М.: Изд-во «Дело». – 600 с.
3. Авакьян С.А. Актуальные проблемы теории представительства в конституционном праве / С.А. Авакьян // Теория народного представительства: научное наследие профессора В.С. Основина и современность, 2018. – Воронеж: Издательский дом ВГУ. – С. 8-18. – EDN: VTDBGGA.
4. Кабанов А.В. Представительская функция руководителя акционерного общества как часть трудовой функции / А.В. Кабанов // Пробелы в российском законодательстве, 2014. – № 4. – С.96-99.
5. Курило Н.П. Представительство как межотраслевой институт процессуального права: возможность унификации / Н.П.Курило // Закон и жизнь, 2013. – № 8/2. – С. 228-232.
6. Моисеев А.М. Представительская функция профсоюзов как ключевой фактор реализации отраслевых функций трудового права / А.М. Моисеев // Проблемы права: теория и практика, 2019. – № 47. – С. 28-38.
7. Субочев В.В. Лоббизм в России: природа, специфика, проблемы правового регулирования / В.В.Субочев // Право и управление. XXI век, 2014. – Т. 31. – № 2. – С. 28-36.
8. Mumford A. Proxy Warfare, Oxford: polity press, 2013, 180 p.
9. Черкашин А.К. Координационное управление природоохранной деятельностью региона: концептуальная модель / А.К.Черкашин, С.И. Лесных, И.П. Складнова // Теоретическая и прикладная экономика, 2019. – № 3. – С.81-97. – DOI:10.25136/2409-8647.2019.3.24404.
10. Черкашин А.К. Научная информация и правовая система в организации территориального управления обществом / А.К. Черкашин // Правовая информатика, 2021. – № 4. – С. 57-69.
11. Котляров И.Д. Аутсорсинг: опыт теоретического описания / И.Д. Котляров // Экономика и экономический менеджмент. – URL:https://economics.ihbt.ifmo.ru/ru/article/6540/autsorsing:_opyt_teoreticheskogo_opisaniya.htm (дата обращения: 28.11.2024).
12. Шангина И.И. Русская свадьба. История и традиция / И.И. Шангина // Азбука-Аттикус, 2017. – 477 с.
13. Зиновьев В.П. Переселение в Сибирь и на Кавказ / В.П. Зиновьев, Н.А. Федорова // Энциклопедия “Петр Аркадьевич Столыпин”. – URL: http://www.stolypin.ru/proekty-fonda/entsiklopediya-petr-arkadevich-stolypin/?ELEMENT_ID=106 (дата обращения: 28.11.2024).
14. Баграмян И. Роль представителей Ставки ВГК в годы войны: Организация и методы их работы / И. Баграмян, И. Выродов // Военно-исторический журнал, 1980. – № 8. – С.25-33.

15. Ходяков М.В. Совнархозы / М.В. Ходяков // Большая российская энциклопедия: [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов. – М.: Большая российская энциклопедия, 2004-2017. – URL: https://old.bigenc.ru/domestic_history/text/3589701.
16. Каневский П.С. Развитие лоббизма в России: теория и практика / П.С. Каневский // Вестник Московского университета. Сер. 18. Социология и политология, 2015. – № 4. – С. 119-134.
17. Гильметдинова З.М. Лоббизм в российской и зарубежной практике / З.М. Гильметдинова // Вестник Казанского юридического института МВД России, 2014. – № 2(16). – С. 122-126.
18. Левчик Д.А. Бастующая Россия. Шахтерские забастовочные комитеты и профсоюзы 1988-1995 гг. / Д.А. Левчик – М.: Директ-Медиа, 2020. – 260 с.
19. Остапенко Т. Понятия и виды представительских функций, осуществляемых в административном процессе представителями самоуправляющихся профессий / Т. Остапенко // *Legea și viața*, 2015. – № 4/2(280). – С. 70-73.
20. Кураков Л.П. Экономика и право: словарь-справочник / Л.П. Кураков, В.Л. Кураков, А.Л. Кураков. – М.: Вуз и школа, 2004. – 1072 с.
21. Черкашин А.К. Политическая география и географическая политология: герменевтические исследования и математическое моделирование электоральных явлений / А.К. Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 2. – С. 5-18.
22. Омаров А.М. Руководитель: размышления о стиле управления / А.М. Омаров. – М.: Изд-во: Политиздат, 1987. – 366 с.
23. Дородных Н.О. Разработка и использование метамоделей для синтеза спецификаций и кодов баз знаний / Н.О. Дородных, О.А. Николайчук, А.Ю. Юрин, С.А. Коршунов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. – № 2 (14). – С. 26-39.
24. Черкашин А.К. География, философия и математика: тождество противоположностей в системе научных знаний / А.К. Черкашин // Тихоокеанская география, 2024. – № 3. – С. 5-22.
25. Черкашин А.К. Метатеоретическое семиотическое моделирование в науке и технике / А.К. Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2022. – № 2(26). – С. 5-23.
26. Андреев Ю.Н. Дифференциально-геометрические методы в теории управления / Ю.Н. Андреев // Автоматика и телемеханика, 1982. – № 10. – С. 5-46.

Черкашин Александр Константинович. Доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории теоретической географии Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, AuthorID: 58425, SPIN: 5266-0499, ORCID: 0000-0002-7596-7780, WOS: K-2418-2017, akcherk@irnok.net, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская 1.

UDC 51–7:303.09

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.012

Representative capacity in organizational management systems: a conceptual metamodel

Aleksander K. Cherkashin

V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS,
Russia, Irkutsk, akcherk@irnok.net

Abstract. Various types of representative functions of society management at different levels are analyzed. Their main characteristics are highlighted. A feature of the functioning of agents in the channels of interaction of autonomous systems is the relative independence of their mediation activities, high professional training and specialization. Representative functions are expressed in the representation and protection of the rights and interests of the principal, mainly in the form of coordination, control and operational information. There is a marked alienation of rights and powers in favor of the representative in accordance with the directives, powers of attorney and contracts received. The customer's representatives have high freedom of communication and office work, but they cannot interfere in the work of the operating companies. The representatives improve the interaction of a legal entity with clients or partners, allow them to effectively solve problems in place and time, and ensure their geographical and hierarchical proximity. The operations carried out by the representative are usually secret,

taking into account the prevailing conditions, with the choice of ways to rationalize the use of funds and resources in the implementation of directives. The advantage of this management link is that its operation does not require high costs. Conceptual metamodels are constructed in nomination of category theory in the form of commutative diagrams of the management subjects' connection as arrows of category morphisms. A generalized vector interpretation of the organizational field is given and it is shown that this approach is through, found in various fields of science at different levels of the systems hierarchy. In such metamodel, numerous agents (lawyers, lobbyists, realtors) represent and protect the rights and interests of clients. They fill the space between institutional significant actors and form the organizational and legal field of social action. There are different levels of representation depending on the degree of alienation of the principal's powers in favor of the executors.

Keywords: management organization, differentiation of social activity, representative capacity, organizational fields, commutative diagrams

Acknowledgments. The study was carried out using funds from a state assignment (state registration number of the topic AAAA-A21-121012190056-4).

References

1. Representative capacity. LSdefine, Simple English definitions for legal terms, available at: <https://www.lsd.law/define/representative-capacity> (accessed: 11/28/2024).
2. Gitelman L.D., Ratnikov B.E. Energeticheskij biznes [Energy business]. Moscow, 2006, Delo Publ., 2006, 600 p.
3. Avakyan S.A. Aktualnye problemy teorii predstavitelstva v konstitucionnom prave [Actual problems of the theory of representation in constitutional right]. Teoriya narodnogo predstavitelstva: nauchnoe nasledie professora V. S. Osnovina i sovremennost, Voronezh: Izdatelskij dom VGU Publ. [The theory of popular representation: the scientific legacy of Professor V. S. Osnovin and modernity, Voronezh: Publishing house of VSU], 2018, pp. 8-18.
4. Kabanova A.V. Predstavitel'skaya funkciya rukovoditelya akcionernogo obshhestva kak chast' trudovoj funkcii [The representative function of the head of a joint-stock company as part of the labor function]. Probely v rossiyskom zakonodatel'stve [Gaps in Russian legislation], 2014, no.4, pp. 96-99.
5. Kurilo N.P. Predstavitel'stvo kak mezhotraslevoj institut processual'nogo prava: vozmozhnost unifikatsii [Representation as an interdisciplinary institute of procedural law: the possibility of unification]. Zakon i zhizni [Law and life], 2013, no. 8/2, pp. 228-232.
6. Moiseev A.M. Predstavitel'skaya funkciya profsoyuzov kak klyuchevoj faktor realizatsii otraslevykh funktsij trudovogo prava [The representative function of trade unions as a key factor in the implementation of sectoral functions of labor law]. Problemy prava: teoriya i praktika [Problems of law: theory and practice], 2019, no. 47, pp. 28-38.
7. Subochev V.V. Lobbizm v Rossii: priroda, specifika, problemy pravovogo regulirovaniya [Lobbying in Russia: nature, specifics, problems of legal regulation]. Pravo i upravleniye [Law and management], 2014, vol. 31, no. 2, pp. 28-36.
8. Mumford A. Proxy Warfare, Oxford: polity press, 2013, 180 p.
9. Cherkashin A.K., Lesnyh S.I., Sklyanova I.P. Koordinatsionnoe upravlenie prirodoohrannoju deyatelnost'yu regiona: konceptual'naya model [Coordination management of environmental protection activities in the region: a conceptual model]. Theoretical and applied economics, 2019, no. 3, pp. 81-97.
10. Cherkashin A. K. Nauchnaya informatsiya i pravovaya sistema v organizatsii territorial'nogo upravleniya obshchestvom [Scientific information and the legal system in the organization of territorial management of the society]. Pravovaya informatika [Legal informatics, 2021], no. 4, pp. 57-69.
11. Kotlyarov I.D. Outsorsing: opyt teoreticheskogo opisaniya. Ekonomika i ekonomicheskij menedzhment [Outsourcing: the experience of theoretical description. Economics and economic management]. Available at: https://economics.ihbt.ifmo.ru/ru/article/6540/outsorsing:_opyt_teoreticheskogo_opisaniya.htm (accessed: 11/28/2024).
12. Shangina I.I. Russkaya svadba. Istoriya i tradiciya [A Russian wedding. History and tradition]. Azbuka-Attikus, 2017, 477 p.
13. Zinov'ev V.P., Fedorova N.A. Pereselenie v Sibir' i na Kavkaz [Resettlement to Siberia and the Caucasus]. Entsiklopediya "Petr Arkad'evich Stolypin" [Encyclopedia "Pyotr Arkadyevich Stolypin"]. Available at: http://www.stolypin.ru/proekty-fonda/entsiklopediya-petr-arkadevich-stolypin/?ELEMENT_ID=106 (accessed: 10/18/2024).
14. Bagramyan I., Vyrodov I. Rol predstavitelej Stavki VGK v gody vojny: Organizatsiya i metody ih raboty [The role of representatives of the Supreme Command Headquarters during the war years: Organization and methods of their work]. Voenno-istoricheskij zhurnal [Military historical magazine], 1980, no. 8, pp. 25-33.

15. Hodyakov M.V. Sovnarhozy [Council of the national economy]. Bolshaya russiyskaya enciklopediya [The Great Russian Encyclopedia]. In 35 volumes, Editor-in-Chief Yu. S.Osipov. Moscow: Bolshaya russiyskaya enciklopediya Publ., 2004-2017, available at: https://old.bigenc.ru/domestic_history/text/3589701..
16. Kanevskij P.S. Razvitie lobbizma v Rossii: teoriya i praktika [The development of lobbying in Russia: theory and practice]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 18. Sotsiologiya i politologiya [Bulletin of the Moscow university. Ser. 18. Sociology and political science], 2015, no. 4. pp. 119-134.
17. Gilmetdinova Z.M. Lobbizm v russijskoj i zarubezhnoj praktike [Lobbying in Russian and foreign practice]. Vestnik Kazanskogo yuridicheskogo instituta MVD Rossii [Bulletin of the Kazan law institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia], 2014, no. 2(16), pp. 122-126.
18. Levchik D.A. Bastuyushhaya Rossiya. Shahterskie zabastovochnye komitety i profsoyuzy 1988–1995 gg [Striking Russia. Miners' strike committees and trade unions 1988-1995], M.: Direkt-Media [Moscow: Direkt-Media Publ.], 2020, 260 p.
19. Ostapenko T. Ponyatiya i vidy predstavitel'skikh funkcij, osushествlyaemykh v administrativnom processe predstavitel'yami samoupravlyayushikhsya professij [Concepts and types of representative functions performed in the administrative process by representatives of self-governing professions]. Leges živiata, 2015, no. 4/2(280), pp. 70-73.
20. Kurakov L.P., Kurakov V.L., Kurakov A.L. Ekonomika i pravo: slovar-spravochnik [Economics and Law: a reference dictionary]. M.: Vuz i shkola [Moscow, Vuz i shkola Publ.], 2004, 1072 p.
21. Cherkashin A.K. Politicheskaya geografiya i geograficheskaya politologiya: germenевticheskie issledovaniya i matematicheskoe modelirovanie elektoralnykh yavlenij [Political geography and geographical political Science: hermeneutical research and mathematical modeling of electoral phenomena]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no.2, pp. 5-18.
22. Omarov A.M. Rukovoditel: razmyshleniya o stile upravleniya [Supervisor: reflections on the management style]. M.: Izd-vo: Politizdat [Moscow, Politizdat Publ.], 1987, 366 p.
23. Dorodnykh N.O., Nikolajchuk O.A., Jurin A.Ju., Korshunov S.A. Razrabotka i ispol'zovanie metamodelej dlja sinteza specifikacij i kodov baz znaniy [Metamodels for specifications and code generation of knowledge bases]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 2 (14), pp. 26-39.
24. Cherkashin A.K. Geografiya, filosofiya i matematika: tozhdestvo protivopolozhnostej v sisteme nauchnykh znaniy [Geography, philosophy and mathematics: the identity of opposites in the system of scientific knowledge]. Tikhookeanskaya geografiya [Pacific Geography], 2024, no. 3, pp. 5-22.
25. Cherkashin A.K. Metateoreticheskoe semioticheskoe modelirovanie v nauke i tekhnike [Meta-theoretical semiotic modeling in science and technology]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2022, no. 2(26), pp. 05-23.
26. Andreev Yu. N. Differencialno-geometricheskie metody v teorii upravleniya [Differential geometric methods in control theory]. Avtomatika i telemekhanika [Automation and telemechanics], 1982, no.10, pp. 5-46.

Aleksander Konstantinovich Cherkashin. Doctor of geographical sciences, professor, chief researcher of the laboratory of Theoretical geography of V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, AuthorID: 58425, SPIN: 5266-0499, ORCID: 0000-0002-7596-7780, WOS: K-2418-2017, akcherk@irnok.net, 664033, Irkutsk, Ulaanbaatar st. 1.

Статья поступила в редакцию 21.07.2024; одобрена после рецензирования 01.04.2025; принята к публикации 10.04.2025.

The article was submitted 07/21/2024; approved after reviewing 04/01/2025; accepted for publication 04/10/2025.

УДК 004.42:005.584.1:631.115

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.013

Мониторинг данных об аграрном производстве для моделирования управленческих решений

Бендик Надежда Владимировна¹, Замаев Алексей Олегович¹,
Иванько Ярослав Михайлович¹, Спесивцев Александр Васильевич²

¹ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, Россия,

Иркутский район, п. Молодежный, iymex@rambler.ru

²Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
Россия, Санкт-Петербург

Аннотация. Современные цифровые технологии позволяют собирать и систематизировать информацию о деятельности сельскохозяйственных предприятий в течение годового цикла, начиная с обработки почвы и завершая уборкой урожая, складированием, переработкой и реализацией продукции с построением плана на новый годовой цикл. Доступность к данным с полей, ферм, спутников, беспилотных летательных аппаратов, автоматизированных агрометеорологических площадок способствует сбору больших объемов информации для управления аграрным производством на разных этапах и планированием на краткосрочную, среднесрочную и долгосрочную перспективы. Развитие систем мониторинга данных, включая использование методов точного земледелия и спутниковой информации, расширяет возможности применения математического моделирования для оптимизации производства в условиях неопределенности многих производственно-экономических, агроклиматических и экологических характеристик.

Ключевые слова: мониторинг данных, производственные процессы, агроклиматические и экологические характеристики, оптимизация, сельское хозяйство, управление предприятием

Цитирование: Бендик Н.В. Мониторинг данных об аграрном производстве для моделирования управленческих решений / Н.В. Бендик, А.О. Замаев, Я.М. Иванько, А.В. Спесивцев // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2(38). – С.158-169. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.013.

Введение. Современные цифровые технологии позволяют получать данные с полей, ферм, карт спутников и беспилотных летательных аппаратов, а также автоматизированных агрометеорологических станций, что способствует формированию большого объема данных. Это, в свою очередь, позволяет детализировать процессы, связанные с производством аграрной продукции, расширяя возможности моделирования разных аспектов деятельности товаропроизводителя [1, 2, 3]. Поскольку аграрное производство относится к сложным системам с влиянием большого числа факторов, многие из которых являются неопределенными, для моделирования ряда процессов можно использовать нечетко-возможностный подход, предложенный в [4].

Развитие системы мониторинга данных [5] способствует расширению возможностей применения задач математического программирования для оптимизации производства аграрной продукции. В частности, детальная информация о механическом, химическом, биологическом состоянии полей сельскохозяйственной организации или крестьянского (фермерского) хозяйства позволяет использовать оптимизационные модели, характеризующие неоднородность сельскохозяйственных угодий и плодородия почвы.

В дополнение к этому увеличивается точность прогнозирования производственно-экономических показателей, как общих, характеризующих работу организации, так и частных, описывающих возможности конкретных полей, ферм, видов растениеводческой и животноводческой продукции [6].

Цель работы заключается в описании мониторинга данных для разработки моделей и алгоритмов прогнозирования и планирования производства сельскохозяйственной продукции, что необходимо для принятия управленческих решений на различных этапах

производственных процессов, а также для разработки прогнозов и планов на краткосрочную, среднесрочную и долгосрочную перспективу.

Для достижения цели необходимо рассмотреть задачи получения информации с объектов мониторинга, формирования базы данных и использования сведений для моделирования объемов производства сельскохозяйственной продукции.

Материалы и методы. В работе рассмотрены научные исследования, проведенные различными авторами, по вопросам отслеживания данных о технологиях производства сельскохозяйственной продукции. Эти исследования имеют целью предоставить рекомендации и решения для улучшения управления производственными процессами в сельском хозяйстве на основе современных информационных технологий и методов анализа данных [7, 8].

В сельском хозяйстве часто используются информационные системы для управления различными аспектами производства, такими, как хранение и анализ данных истории полей, применение онлайн-сервисов для получения спутниковой информации и данных о погоде, решения управленческих вопросов с помощью технологий интернета вещей, оценки опасных зон в сельском хозяйстве и т.д. [9-12]. В работе [13] предложено интегрировать различные системы в сельском хозяйстве на базе ведущих платформ.

Обратимся к программному интерфейсу приложений API, который представляет собой набор определенных правил и протоколов, позволяющих разным программным системам взаимодействовать между собой, обмениваться данными и вызывать определенные функции или процедуры. В табл. 1 приведен пример взаимодействия программного интерфейса API с четырьмя приложениями: системой «Агросигнал», федеральной государственной информационной системой «Зерно», федеральной службой государственной статистики (Росстат) и синоптическому сервису «Яндекс Погода». Рассмотрены примеры запросов и взаимодействия программного интерфейса API с перечисленными приложениями.

Общие этапы интеграции предполагают: 1) создание: использование HTTP-запроса для обращения к API; 2) обработка ответов (обработка JSON или XML ответов для извлечения необходимых данных); 3) хранение данных в 1С (сохранение полученных данных в соответствующих справочниках или документах 1С для дальнейшего использования).

Таблица 1. Примеры работы с внешними информационными системами посредством API и 1С

Агросигнал. Предоставляет информацию о сельскохозяйственных событиях, рекомендациях и предупреждениях. Пример запроса: GET https://api.agrosignal.ru/v1/events?apikey=<api_key> Интеграция: Функция ПолучитьСельхозСобытия (Адрес) URL = "https://api.agrosignal.ru/v1/events?apikey=ВашAPIКлюч"; Ответ = HTTPЗапрос(URL); Данные = ОбработкаОтвета(Ответ); Возврат Данные; КонецФункции;"	ФГИС Зерно. Предоставляет информацию о зерновых культурах, их производстве и хранении. Пример запроса: GET https://api.fgisgrain.ru/v1/crops?apikey=<apikey> Интеграция: Функция ПолучитьГеоДанные(Адрес) URL = "https://api.fgisgrain.ru/v1/crops?apikey=ВашAPIКлюч"; Ответ = HTTPЗапрос(URL); Данные = ОбработкаОтвета(Ответ); Возврат Данные; КонецФункции;"
--	---

Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Предоставляет статистические данные о сельском хозяйстве и другие данные. Пример запроса: GET https://api.gks.ru/statistics/agriculture?apikey=<api_key> Интеграция: Функция ПолучитьСтатистическиеДанные (Адрес) URL = "https://api.gks.ru/statistics/agriculture?apikey=ВашAPIКлюч"; Ответ = HTTPЗапрос(URL); Данные = ОбработкаОтвета(Ответ); Возврат Данные; КонецФункции;	Яндекс.Погода. Предоставляет информацию о погоде и прогнозы. Пример запроса: GET https://api.weather.yandex.ru/v2/forecast?lat=<latitude>&lon=<longitude>&lang=ru_RU Интеграция: Функция ПолучитьПрогнозПогоды(Широта, Долгота) URL = "https://api.weather.yandex.ru/v2/forecast?lat=" + Широта + "&lon=" + Долгота + "&lang=ru_RU"; Заголовки = Новый Структура; Заголовки.Вставить("X-Yandex-API-Key", "ВашAPIКлюч"); Ответ = HTTPЗапрос(URL, Заголовки); Данные = ОбработкаОтвета(Ответ); Возврат Данные; КонецФункции;"
---	---

Взаимодействие с системой «Агросигнал» позволяет осуществлять мониторинг состояния и изменения почвы, посевов, урожая, метеорологических характеристик, влияние экстремальных явлений на урожай и др. (табл. 2).

Таблица 2. Некоторые возможности системы «Агросигнал»

Тип данных	Примеры данных	Возможное использование
Метеорологические данные	Температура воздуха, влажность воздуха, осадки, скорость и направление ветра, давление	– прогнозирование погодных условий; – планирование агротехнических мероприятий (например, полив, обработка пестицидами);
Данные о состоянии почвы	Влажность почвы, температура почвы, плодородие и состав почвы	– оптимизация полива; – планирование внесения удобрений; – оценка плодородия почвы
Данные о посевах	Типы культур, фазы роста культур, плотность посевов, индексы вегетации (ndvi)	– прогнозирование урожайности; – мониторинг состояния посевов; – планирование уборки урожая
Данные об агротехнических мероприятиях	Посев, внесение удобрений, полив, обработка пестицидами, уборка урожая	– контроль и учет агротехнических операций; – оптимизация использования ресурсов;
Данные о полях и участках	Площадь и границы полей, карты плодородия, карты аномалий	– управление земельными ресурсами; – анализ эффективности использования земель;
Исторические данные	Прошлые урожаи, прошлые погодные условия, история агротехнических мероприятий	– анализ тенденций и закономерностей; – долгосрочное планирование и прогнозирование.

Взаимодействие с системой «Яндекс Погода» позволяет получать актуальные данные о погодных условиях, прогнозы на несколько дней вперед, информацию о температуре, влажности, осадках, скорости, направлении ветра и других метеорологических

характеристиках. Это может быть полезно для различных задач, таких, как планирование сельскохозяйственных работ, логистика, управление запасами и многое другое.

ФГИС «Зерно» позволяет осуществлять мониторинг и управление процессами, связанными с производством, хранением, переработкой и оборотом зерна и зернопродуктов. Система предоставляет доступ к данным о качестве зерна, его происхождении, движении, а также позволяет оформлять и отслеживать различные документы и сертификаты.

Материалы «Росстат» в контексте сельского хозяйства позволяют получать доступ к важным статистическим данным: объемам производства продукции, посевным площадям, урожайности, экономическим показателям отрасли и др. Такие данные применимы для анализа тенденций деятельности сельскохозяйственных товаропроизводителей, выявления недостатков, оценки рисков, планирования и принятия управленческих решений.

Основные результаты. Архитектура системы мониторинга данных сельскохозяйственного производства определяет структуру, компоненты и взаимосвязи между ними для эффективного сбора, хранения, анализа и визуализации информации о процессах и параметрах сельскохозяйственного производства (рис. 1). Система мониторинга включает в себя хранилище данных, аналитическую систему и подсистемы интеграции с внешними источниками данных, а также интерфейсы для пользовательского доступа и управления системой [14].



Рис.1. Архитектура системы мониторинга данных сельскохозяйственного производства

Архитектура системы мониторинга данных сельскохозяйственного производства обеспечивает основу для эффективного управления сельскохозяйственным предприятием, опираясь на надежные и актуальные данные.

Рассмотрим функциональные возможности проектируемой системы (рис. 2). Контекстная диаграмма функциональной модели для данной системы будет представлять общую картину взаимодействия между системой 1С и внешними информационными системами с использованием API, а также выходные отчеты, создаваемые на основе

полученных данных. API обеспечивает интерфейс для взаимодействия между системой 1С и внешними информационными системами.

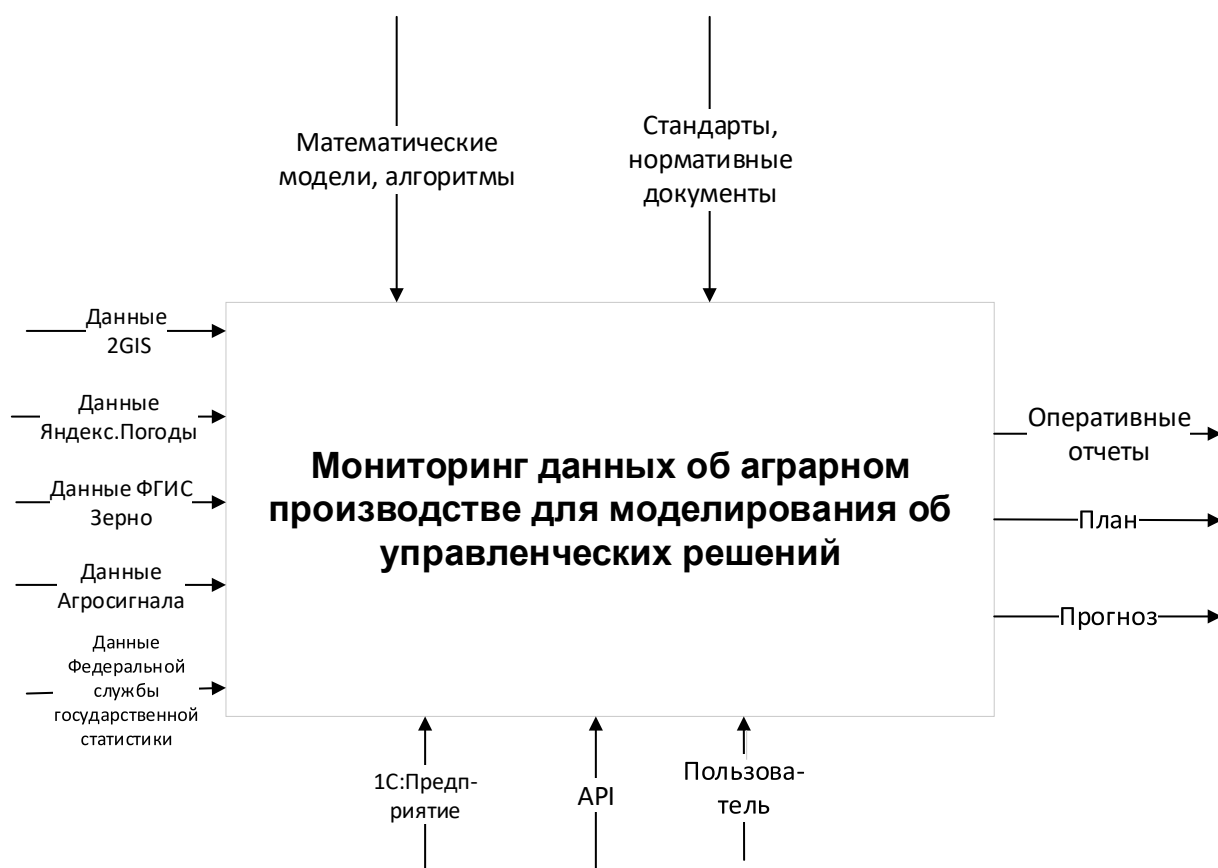


Рис. 2. Контекстная диаграмма функциональной модели

На выходе конечный пользователь получает оперативные отчеты по планированию, прогнозированию и визуализации данных, которые создаются на основе данных, полученных из внешних информационных систем с использованием API. Они включают в себя информацию о планировании сельскохозяйственных работ, прогнозах погоды, урожайности и других аспектах, а также визуализацию этих данных для удобства анализа и принятия решений.

Прогнозирование. Создание интерфейса информационной системы с помощью API позволяет реализовывать следующие модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур и других производственно-экономических в сельском хозяйстве.

Во-первых, полученные факторные модели, характеризующие зависимость урожайности сельскохозяйственных культур от температуры воздуха и осадков в начале вегетационного периода [6] ориентированы на прогнозирование результативного признака в текущем году, по итогам уборки урожая. В конкретном случае необходимая информация для решения этой задачи будет получена из систем «Агросигнал», «Яндекс Погода» и «Росстат», благодаря наличию текущих и многолетних данных о температурах воздуха, осадках, в том числе прогностических, а также урожайности сельскохозяйственных культур.

Во-вторых, на основе использования многоуровневых трендов [15] согласно мониторингу данных «Росстат» можно спрогнозировать или оценить с помощью законов распределения вероятностей производственно-экономические характеристики на многолетнюю перспективу, учитывая изменчивые условия климатической и

производственной среды, в которой осуществляется деятельность сельскохозяйственного предприятия. Эти результаты применимы в планировании.

В-третьих, благодаря данным информационной системы «Агросигнал» возможен мониторинг вегетации растений, позволяющий прогнозировать урожай сельскохозяйственных культур в текущем году. При этом осуществляется сравнительный анализ результатов прогнозирования по факторной модели и мониторингу вегетации растений.

В-четвертых, мониторинг развития растительного покрова, метеорологических, гидрологических и биологических ситуаций способствует непрерывной оценке влияния экстремальных событий на величину урожая, поэтому можно оценивать вероятные потери сельскохозяйственной продукции.

В-пятых, результаты моделирования применимы для оценки объемов произведенной продукции с пополнением данных ФГИС «Зерно».

Для прогнозирования, например, урожайности сельскохозяйственных культур на основе многолетних данных об урожайности и метеорологических факторах можно использовать библиотеку `pandas` для обработки данных, `scikit-learn` для построения модели и `matplotlib` для визуализации результатов. При этом исходные данные получаем из систем «Агросигнал», «Яндекс Погода» и «Росстат». В листинге 1 приведен код описанных функций:

Листинг 1. Анализ и моделирование данных с последующим экспортом результатов

```
import pandas as pd, import numpy as np
from sklearn.linear_model import LinearRegression, from sklearn.model_selection
import train_test_split
# Чтение данных из Excel файла
data = pd.read_excel('path_to_file.xlsx')
# Обработка данных Пример: добавление новых признаков на основе имеющихся данных
data['Поле3'] = data['Поле1'] * data['Поле2']
# Моделирование и прогнозирование
X = data[['Поле1', 'Поле2', 'Поле3']]; y = data['Целевая_Переменная']
# Разделение данных на обучающую и тестовую выборки
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2,
random_state=42)
# Создание и обучение модели
model = LinearRegression()
model.fit(X_train, y_train)
# Прогнозирование
predictions = model.predict(X_test)
# Экспорт результатов в Excel
results = pd.DataFrame({'Прогноз': predictions})
results.to_excel('path_to_results.xlsx', index=False)
```

Планирование. Выявление закономерностей изменчивости производственно-экономических характеристик, описывающих ведение сельского хозяйства, позволяет уменьшать неопределенность, повышая эффективность прикладных экстремальных задач, с помощью которых осуществляется оптимизация производства, переработки и реализации продукции.

Мониторинг состояния почвы, различных технологических процессов, развития сельскохозяйственных растений, уборки урожая, влияния внешних факторов на состояние посевов способствует детализации потенциальной оценки того или иного участка земли для оптимизации ресурсов с целью получения максимальной прибыли. Для этого могут быть использованы модели математического программирования, учитывающие неоднородность сельскохозяйственных угодий [16].

Здесь выделим задачу линейного и параметрического программирования. Первая модель позволяет оценить производство продукции в конкретный момент или год. Между тем, для

планирования объемов продукции на среднесрочную и долгосрочную перспективу предпочтительнее использовать многоуровневые модели параметрического программирования с учетом усредненных, благоприятных и неблагоприятных условий ведения сельскохозяйственного производства. При этом при построении оптимизационной модели, описывающей ситуации получения продукции в условиях проявления вероятностных событий, предлагается дополнительно учитывать неоднородность земель, экологические и биологические факторы.

Кроме того, на основании моделей [16, 17] предлагается модифицированный вариант эколого-математической модели, особенностью которого является учет неоднородности сельскохозяйственных угодий, связанной с разным потенциалом получения урожая. Предлагаемая модель записывается в виде:

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} (1 - l_{ijs}) c_{ijs} x_{ijs} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} c'_{klv} x_{klv} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где c_{ijs} – доход, получаемый с единицы площади поля i на участке j в виде продукции s ; c'_{klv} – доход, получаемый от производства единицы продукции вида v по технологии l от животного вида k ; x_{ijs} , x_{klv} – неизвестные переменные задачи линейного программирования; l_{ijs} – коэффициенты негативного воздействия техногенных и природных процессов на почву поля i , участка j при получении продукции s .

Неравенство по производству продукции можно записать так:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} (1 - l_{ijs}) \alpha_{ijs} x_{ijs} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \beta_{klv} x_{klv} \geq D, \quad (2)$$

где α_{ijs} и β_{klv} – объемы производства с единицы площади поля i на участке j растениеводческой продукции s и объемы производства животноводческой продукции v по технологии l от животного вида k ; D – заданный объем получения продукции.

Ограничение по использованию трудовых ресурсов запишем в виде:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} d_{ijs} x_{ijs} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} w_{klv} x_{klv} \geq E, \quad (3)$$

где d_{ijs} и w_{klv} – трудозатраты на производство растениеводческой продукции s с единицы площади поля i на участке j и животноводческой продукции v по технологии l от животного вида k ; E – возможности использования трудозатрат.

Ограничение по обеспечению животных необходимыми элементами питания благодаря производству кормов выглядит следующим образом:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} (1 - l_{ijs}) u_{z i j s} \alpha_{ijs} x_{ijs} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \lambda_{z i j s} m_{ijs} x_{ijs} \geq \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{v \in V} b_{z k l v}, \quad (4)$$

где $u_{z i j s}$ – содержание элемента питания z в единице кормовой продукции, полученной от производства растениеводческой продукции s с единицы площади поля i на участке j ; α_{ijs} – объемы производства с единицы площади поля i на участке j растениеводческой продукции s ; $\lambda_{z i j s}$ – содержание элемента питания z в единице побочной кормовой продукции; m_{ijs} – выход с единицы площади, полученной от производства кормов s с единицы площади поля i на участке j ; $b_{z k l v}$ – минимальная потребность в элементе питания z единицы поголовья от производства животноводческой продукции v по технологии l животного вида k . Причем $z \in Z$.

Результатом решения задачи (1) - (4) будет оптимальное решение: целевая функция f^* составит максимальное значение дохода с оптимальными планами x_{ijs}^* и x_{klv}^* . Другими словами, определяются оптимальные планы площадей или объемов производства продукции

растениеводства и животноводства в сочетании, при которых целевая функция достигнет максимального значения.

Ограничения, связанные с использованием разных по плодородию площадей, имеют вид:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} x_{ijs} \leq E, \quad (5)$$

где E – наличие сельскохозяйственных угодий, с учетом неоднородности.

Неравенство по соблюдению предельно допустимой концентрации вредных веществ в почве выглядят так:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} \varphi_{ijsn} x_{ijs} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} v_{ijsn} x_{ijs} \leq \Omega_n, \quad (6)$$

где φ_{ijsn} – исходная концентрация вредного вещества n с единицы площади поля i на участке j в виде продукции s (мг/м³/га); вредное вещество n с концентрацией V_{ijsn} , поступающее на единичную площадь поля i участка j с производством продукции s (мг/м³/га); Ω_n – значения предельно допустимой концентрации вредного вещества n в почве (мг/м³); N – множество вредных веществ.

Ограничение на почвенные потери от водной и ветровой эрозии имеет вид:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} R U_{ijs} D_{ijs} V_{ijs} C_{ijs} P_{ijs} x_{ijs} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} M_{ijs} T x_{ijs} \leq \eta, \quad (7)$$

где η – потери почвы за год (т/га); R – эродирующая способность дождей (т/га); U_{ijs} – показатель, характеризующий подверженность почв эрозионным процессам на поле i , участке j с производством продукции s ; D_{ijs} – фактор, отображающий длину склона на поле i , участке j с производством продукции s ; V_{ijs} – фактор крутизны склона поля i , участка j с производством продукции s ; C_{ijs} – фактор растительности и севооборота на поле i , участке j с производством продукции s ; P_{ijs} – фактор эффективности противоэрозионных мероприятий на поле i , участке j с производством продукции s ; M_{ijs} – интенсивность выноса почвы на поле i , участке j с производством продукции s , т/га в 1 час, T – время, в течение которого почва разрушается, час.

В неизвестных переменных модели должны присутствовать только неотрицательные значения:

$$x_{ijs}, x_{klv} \geq 0. \quad (8)$$

Модель (1) - (8) использована для оптимизации производства аграрной продукции согласно данным ЗАО «Иркутские семена». При решении задачи оптимизации площадей посевов и поголовья свиней получены результаты, приведенные в таблице 3. Помимо прибыли определены ущербы, вызванные эрозией почвы. При формировании модели использованы ограничения по посевным площадям сельскохозяйственных культур, поголовью свиней, валовому сбору продукции разных видов, трудовым ресурсам, оплате труда, внесению удобрений, защите растений, топливным ресурсам, другим затратам и загрязнению почвы вредными металлами.

Таблица 3. Решение задачи линейного программирования для ЗАО «Иркутские семена» с учетом неоднородности полей по плодородию и ущерба земельным ресурсам

Пшеница товарная, поле 1, га	Пшеница товарная, поле 2, га	Ячмень товарный, поле 1, га	Ячмень товарный, поле 2, га	Овес товарный, га	Зерновые (кормо- вые), га	Рапс яровой, га
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
100	200	1625,1	200	100	500	50
Картофель, га	Многолетние травы на сено, га	Свиноматки, гол.	Свиньи на откорме, гол.	Ущерб, тыс. руб.	Прибыль, тыс. руб.	
x_8	x_9	x_{10}	x_{11}			
610,6	189,2	75	698	1851,266	7543,793	

Согласно полученным результатам, прибыль превышает 7,5 млн руб. При этом ущерб от загрязнения почвы составил 24,5 %, что требует дополнительных затрат на улучшение состояния земельных ресурсов.

Закключение. Описана проектируемая система мониторинга данных о деятельности сельскохозяйственного предприятия. Предложено интегрировать данные, связанные с получением аграрной продукции, в систему мониторинга с помощью программного интерфейса API, позволяющего взаимодействовать с системами: «Агросигнал», «Росстат», ФГИС «Зерно», «Яндекс.Погода» и др. Выделены разработанные модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур, которые могут быть использованы в разрабатываемой системе.

Для планирования производства аграрной продукции предложено использовать эколого-математическую модель, описывающую деятельность сельскохозяйственного предприятия с учетом климатических, биологических, экологических факторов и неоднородности сельскохозяйственных угодий по потенциалу получения урожая.

Список источников

1. Уколова Н.В. Мониторинг новых разработок России и Китая в области цифровизации сельского хозяйства / Н.В. Уколова, Ю.А. Шиханова, Л.Н. Потоцкая // Проблемы теории и практики управления, 2022. – № 1. – С. 40-50. – DOI: 10.46486/0234-4505-2022-01-40-50. – EDN ZKUUKH.
2. Южаков М.С. Применение технологии дистанционного зондирования Земли совместно с системой наземного мониторинга почвенно-климатических параметров в сельском хозяйстве / М.С. Южаков, А.В. Бадьин, И.В. Спешиллов и др. // Актуальные проблемы радиофизики АПР-2023. Сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Томск, 26–29 сентября 2023 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2023. – С. 109-113. – EDN MUAQSZ.
3. Беляева А.С. О проблемах и перспективах цифровой трансформации отечественного АПК / А. С. Беляева, А. А. Никитина // Достижения науки и техники АПК, 2023. – Т. 37. – № 1. – С. 34-40. – EDN EAGGHZ.
4. Спесивцев А.В. Описание теоретико-множественных моделей и многоэтапного алгоритма планирования функционирования трудноформализуемых сложных агробиотехнических объектов / А.В. Спесивцев, Б.В. Соколов, А.И. Семенов // Информатизация и связь, 2024. – № 5. – С. 72-78.
5. Тимофеев Е.В. Анализ современных информационных систем мониторинга процессов производства в сельском хозяйстве / Е.В. Тимофеев, А.Ф. Эрк, В.А. Размук и др. // АгроЭкоИнженерия, 2021. – № 1(106). – С. 4-15. – EDN LKMFTU.
6. Иваньо Я.М. Задача параметрического программирования с моделями прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур / Я.М. Иваньо, М.Н. Барсукова, Ю.В. Столопова и др. // Прикладная информатика. 2021. – Т. 6. – № 6 (96). – С. 131-143.
7. Ганиева И.А. Предпосылки создания информационно-ресурсной цифровой платформы интеллектуального управления системами земледелия и землепользования для агропромышленного комплекса России / И.А. Ганиева // Достижения науки и техники АПК, 2019. – Т. 33. – № 12. – С. 110-116. – EDN KXIACZ.

8. Замараева А.А. Современные методы мониторинга состояния почвы и их роль в сельском хозяйстве / А.А. Замараева // Генезис и онтология инновационно ориентированной деятельности в условиях цифровизации: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Омск, 28 декабря 2023 года. – Уфа: ООО “Аэтерна”, 2023. – С. 287-290. – EDN MNOTYK.
9. Степных Н.В. Использование цифровых технологий в растениеводстве для хранения и анализа данных истории полей / Н.В. Степных, Е.В. Нестерова, А.М. Заргарян, и др. // Достижения науки и техники АПК, 2022. – Т. 36. – № 3. – С. 97-102. – DOI: 10.53859/02352451_2022_36_3_97. – EDN DKCRZV.
10. Каленкова С.Ю. Новое оборудование и технологии для аграриев: применение онлайн-сервисов мониторинга полей и управления сельским хозяйством / С.Ю. Каленкова // Наука сегодня: реальность и перспективы: Материалы международной научно-практической конференции, Вологда, 27 февраля 2019 года. – Вологда: ООО “Маркер”, 2019. – С. 43-44. – EDN RTGJVI.
11. Коломиец М.А. Технологии Интернета вещей в сельском хозяйстве / М.А. Коломиец, Г.В. Очкур, А.Г. Мотков // Проблемы современной экономики и прикладные исследования: молодежные проекты: Материалы VII Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Владимир, 14 апреля 2024 года. – Владимир: АРКАИМ, 2024. – С. 187-192. – EDN OIXCDV.
12. Яковлева Е.В. Цифровая трансформация мониторинга опасных зон в сельском хозяйстве / Е.В. Яковлева, М.О. Быков, А.С. Фролов // Безопасность жизнедеятельности, 2021. – № 8 (248). – С. 3-8. – EDN QJIFYH.
13. Выгузов М.Е. Интеграция инновационных систем мониторинга для "умного" сельского хозяйства / М.Е. Выгузов, А.А. Горбачева, И.А. Нечаев, и др. // Znanstvena Misel, 2020. – № 38-1(38). – С. 57-60. – EDN BEQXMQ.
14. Asalkhanov P.G., Bendik N.V., Fedurina N.I. Some aspects of digital transformation of agriculture in the Irkutsk region. Smart innovation, systems and technologies, 2022, vol. 272, pp. 643-649.
15. Иваньо Я.М. Об одном алгоритме выделения аномальных уровней временного ряда для оценки рисков / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова // Актуальные вопросы аграрной науки, 2022. – № 42. – С. 48-57.
16. Иваньо Я.М. О трех моделях линейного программирования применительно к производству аграрной продукции / Я.М. Иваньо, И.А. Ковадло., Н.И. Федурин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 3 (31). – С. 124-135. – DOI: 10.25729/ESI.2023.31.3.012.
17. Иваньо Я.М. Эколого-математическое моделирование производства аграрной продукции: монография / Я.М. Иваньо, Е.А. Ковалева. – Молодежный: Изд-во ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, 2024. – 118 с.

Бендик Надежда Владимировна. Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. AuthorID: 518350, SPIN: 6088-4232, ORCID: 0000-0002-3097-8953, starkovan@list.ru, 664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский район, пос. Молодежный.

Замараев Алексей Олегович. Аспирант кафедры информатики и математического моделирования института экономики управления Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. AuthorID: 1121471, SPIN: 3192-8040, ORCID: 0009-0006-0256-9198, 1C@irsau.ru, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный.

Иваньо Ярослав Михайлович. Доктор технических наук, профессор кафедры информатики и математического моделирования института экономики, управления и прикладной информатики. Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского. AuthorID: 106394, SPIN: 9654-8057, ORCID: 0000-0003-4118-7185, iasa_econ@rambler.ru, 664038, Россия, Иркутская обл., Иркутский район, пос. Молодежный.

Снесивцев Александр Васильевич. Доктор технических наук, доцент, ведущий специалист лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, СПб ФИЦ РАН. AuthorID: 1078665, SPIN: 9085-1461, ORCID: 0000-0002-8928-4585, info@sprcras.ru, 199178, Россия, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., д. 39.

UDC 004.42:005.584.1:631.115

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.013

Monitoring data on agricultural production for modeling management decisions

Nadezhda V. Bendik¹, Aleksey O. Zamaraev¹, Yaroslav M. Ivan'o¹, Aleksandr V. Spesivtsev²

¹Irkutsk State Agriculture University,

Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny settlement, *iymex@rambler.ru*

²Saint Petersburg Federal research center of the RAS,

Russia, Saint Petersburg

Abstract. Modern digital technologies allow collecting and systematizing information on the activities of agricultural enterprises during the annual cycle, starting with soil cultivation and ending with harvesting, storage, processing and sale of products with the construction of a plan for a new annual cycle. Access to data from fields, farms, satellites, unmanned aerial vehicles, automated agrometeorological sites contribute to the collection of large volumes of information for managing agricultural production at different stages and planning for the short, medium and long term. The development of data monitoring systems, including the use of precision farming methods and satellite information, expands the possibilities of using mathematical modeling to optimize production in conditions of uncertainty of many production-economic, agroclimatic and environmental characteristics.

Keywords: data monitoring, production processes, agroclimatic and environmental characteristics, optimization, agriculture, enterprise management

References

1. Ukolova N.V., SHihanova YU.A., Potockaya L.N. Monitoring novykh razrabotok Rossii i Kitaya v oblasti cifrovizatsii sel'skogo hozyajstva [Monitoring new developments in Russia and China in the field of digitalization of agriculture]. Problemy teorii i praktiki upravleniya [Problems of management theory and practice], 2022, no. 1, pp 40-50, DOI: 10.46486/0234-4505-2022-01-40-50, EDN ZKUUKH.
2. YUzhakov M.S., Bad'in A.V., Speshilov I.V. Primenenie tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya Zemli sovmestno s sistemoy nazemnogo monitoringa pochvenno-klimaticheskikh parametrov v sel'skom hozyajstve [Application of Earth remote sensing technology together with the ground-based monitoring system of soil and climate parameters in agriculture]. Aktual'nye problemy radiofiziki APR-2023: Cbornik trudov X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Tomsk, 26–29 sentyabrya, 2023) [Collection of works of the X International scientific and practical conference (Tomsk, September 26–29, 2023)]. Tomsk, 2023, pp. 109-113, EDN MUAQSZ.
3. Belyaeva A.S., Nikitina A.A. O problemah i perspektivah cifrovoj transformatsii otechestvennogo APK [On the problems and prospects of digital transformation of the domestic agro-industrial complex]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK [Achievements of science and technology of the agro-industrial complex], 2023, 37, no. 1, pp. 34-40, EDN EAGGHZ.
4. Spesivtsev A.V., Sokolov B.V., Semenov A.I. Opisanie teoretiko-mnozhestvennykh modelej i mnogoetapnogo algoritma planirovaniya funkcionirovaniya trudnoformalizuemykh slozhnykh agrobiotekhnicheskikh ob'ektov [Description of set-theoretic models and a multi-stage algorithm for planning the functioning of difficult-to-formalize complex agrobiotechnical objects]. Informatizatsiya i svyaz' [Informatization and Communication], 2024, no. 5, pp. 72-78.
5. Timofeev V.E., Erk A.F., Razmuk V.A. Analiz sovremennykh informacionnykh sistem monitoringa processov proizvodstva v sel'skom hozyajstve [Analysis of modern information systems for monitoring production processes in agriculture]. AgroEkoInzheneriya [AgroEcoEngineering], 2021, no. 1(106), pp. 4-15, EDN LKMFTU.
6. Ivan'o YA.M., Barsukova M.N., Stolopova YU.V., et al. Zadacha parametricheskogo programmirovaniya s modelyami prognozirovaniya urozhajnosti sel'skohozyajstvennykh kul'tur [Parametric programming problem with crop yield forecasting models]. Prikladnaya informatika [Applied informatics], 2021, 16, no.6 (96), pp. 131-143.
7. Ganieva I.A. Predposylki sozdaniya informacionno-resursnoy cifrovoj platformy intellektual'nogo upravleniya sistemami zemledeliya i zemlepol'zovaniya dlya agropromyshlennogo kompleksa Rossii [Prerequisites for the creation of an information and resource digital platform for intelligent management of farming and land use systems for the agro-industrial complex of Russia]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK [Achievements of science and technology of the agro-industrial complex], 2019, 33, no. 12, pp. 110-116, EDN KXIACZ.
8. Zamaraeva A.A. Sovremennyye metody monitoringa sostoyaniya pochvy i ih rol' v sel'skom hozyajstve [Modern methods of monitoring soil conditions and their role in agriculture]. Genezis i ontologiya innovacionno orientirovannoy deyatel'nosti v usloviyakh cifrovizatsii: sbornik statej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [Collection of articles of the All-Russian scientific and practical

- conference with international participation (Omsk, December 28, 2023)]. Omsk, 28 dekabrya 2023. Ufa, 2023, pp. 287-290, EDN MNOTYK.
9. Stepanyh N.V., Nesterova E.V., Zargaryan A.M., et al. Ispol'zovanie cifrovyyh tekhnologiy v rastenievodstve dlya hraneniya i analiza dannyh istorii polej [Using digital technologies in crop production for storing and analyzing field history data]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK [Achievements of science and technology of the agro-industrial complex], 2022, 36, no. 3, pp. 97-102, EDN DKCRZV.
 10. Kalenkova S.YU. Novoe oborudovanie i tekhnologii dlya agrariyev: primeneniye onlajn-servisov monitoringa polej i upravleniya sel'skim hozyajstvom [New equipment and technologies for farmers: application of online services for monitoring fields and agricultural management]. Nauka segodnya: real'nost' i perspektivy: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii [Proceedings of the international scientific and practical conference (Vologda, February 27, 2019)], Vologda, 27 fevralya 2019. Vologda, 2019, pp. 43-44.
 11. Kolomic M.A., Ochkur G.V., Motkov A.G. Tekhnologii Interneta veshchej v sel'skom hozyajstve [IoT technologies in agriculture]. Problemy sovremennoj ekonomiki i prikladnye issledovaniya: molodezhnye proekty: Materialy VII Vserossijskoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Vladimir, 14 aprelya 2024) [Proceedings of the VII All-Russian youth scientific and practical conference (Vladimir, April 14, 2024)], 2024, pp. 187-192, EDN OIXCDV.
 12. YAKovleva E.V., Bykov M.O., Frolov A.S. Cifrovaya transformaciya monitoringa opasnyh zon v sel'skom hozyajstve [Digital Transformation of Hazardous Area Monitoring in Agriculture]. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti [Life safety], 2021, no 8(248), pp 3-8, EDN QJIFYH.
 13. Vyguzov M.E., Gorbacheva A.A., Nechaev I.A., et al. Integraciya innovacionnyh sistem monitoringa dlya "umnogo" sel'skogo hozyajstva [Integration of innovative monitoring systems for smart agriculture]. Znanstvena Misel, 2020, no 38-1(38), pp. 57-60, EDN BEQXMQ.
 14. Asalkhanov P.G., Bendik N.V., Fedurina N.I. Some aspects of digital transformation of agriculture in the Irkutsk region. Smart innovation, systems and technologies, 2022, vol. 272, pp. 643-649.
 15. Ivan'o YA.M., Petrova S.A. Ob odnom algoritme vydeleniya anomal'nyh urovnej vremennogo ryada dlya ocenki riskov [On one algorithm for identifying abnormal levels of a time series for risk assessment]. Aktual'nye voprosy agrarnoj nauki [Current issues of agricultural science], 2022, no. 42, pp. 48-57.
 16. Ivan'o YA.M., Kovadlo I.A., Fedurina N.I. O trekh modelyah linejnogo programmirovaniya primenitel'no k proizvodstvu agrarnoj produkcii [On three models of linear programming applied to agricultural production]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 3 (31), pp. 124-135, DOI: 10.25729/ESI.2023.31.3.012.
 17. Ivan'o YA.M., Kovaleva E.A. Ekologo-matematicheskoe modelirovanie proizvodstva agrarnoj produkcii [Ecological and mathematical modeling of agricultural production: monograph]: monografiya. Molodezhnyj: Izd-vo FGBOU VO Irkutskij GAU [Publishing house of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk State Agrarian University], 2024, 118 p.

Bendik Nadezhda Vladimirovna. Candidate of technical sciences, associate professor of the department of informatics and mathematical modeling of the institute of economics, management and applied informatics, Irkutsk state agriculture university named after A.A. Ezhevsky. AuthorID: 518350, SPIN: 6088-4232, ORCID: 0000-0002-3097-8953, starkovan@list.ru, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny settlement.

Zamaraev Aleksey Olegovich. Postgraduate student of the department of informatics and mathematical modeling of the institute of economics and management, Irkutsk state agriculture university named after A.A. Ezhevsky. AuthorID 1121471, SPIN: 3192-8040, ORCID: 0009-0006-0256-9198, 1C@irsau.ru, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, settlement Molodezhny.

Ivan'o Yaroslav Mikhailovich. Doctor of technical sciences, professor of the department of informatics and mathematical modeling of the institute of economics, management and applied informatics. Irkutsk state agriculture university named after A.A. Ezhevsky. AuthorID: 106394, SPIN: 9654-8057, ORCID: 0000-0003-4118-7185, iasa_econ@rambler.ru, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, settlement Molodezhny.

Spesivtsev Alexander Vasilievich. Doctor of technical sciences, associate professor, leading specialist of the laboratory of information technologies in systems analysis and modeling, St. Petersburg Federal research center of the Russian Academy of Sciences. AuthorID: 1078665, SPIN: 9085-1461, ORCID: 0000-0002-8928-4585, info@sprcras.ru, 199178, Russia, St. Petersburg, 14th Line of V.O., Bldg. 39.

Статья поступила в редакцию 13.02.2025; одобрена после рецензирования 04.04.2025; принята к публикации 10.04.2025.

The article was submitted 02/13/2025; approved after reviewing 04/04/2025; accepted for publication 04/10/2025.

УДК 621.3

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.014

Прогностическая модель оценки успешности обучения на основе метрической идентификации индивидуального образовательного маршрута

Степанов Михаил Александрович¹, Гергет Ольга Михайловна²

¹Томский политехнический университет «ИШИТР»,

Россия, Томск, mas65@tpu.ru

²Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Россия, Москва

Аннотация. В статье предложена комплексная модель оценки успешности обучения на основе методов теории распознавания и обработки многомерных данных в рамках деятельностного направления, которое включает широкий спектр современных методик обучения, основанных на интеллектуальном анализе данных обучающегося, его цифрового следа, планирования элементов в составе учебно-методических комплексов и прогнозировании результатов обучения. Траектория обучения формируется, как поэлементная кластеризация взаимосвязанных последовательностей данных, в частности, трудоемкости элементов дисциплин, социально-демографических параметров обучающихся, результатов промежуточных аттестаций освоения рабочих программ. Реализована нейросетевая модель прогнозной экстраполяции результатов обучения. Представлены результаты экспериментальных исследований модели прогнозирования успешности обучения по выборкам данных, аккумулированным в цифровых системах управления обучением.

Ключевые слова: индивидуальная образовательная траектория, пространственная экстраполяция, параметрическая идентификация, прогноз успешности обучения, многослойная нейронная сеть, метрические методы, метод Кульбака-Лейблера

Цитирование: Степанов М.А. Прогностическая модель оценки успешности обучения на основе метрической идентификации индивидуального образовательного маршрута / М.А. Степанов, О.М. Гергет // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2(38). – С. 170-181. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.014.

1. Введение. Модернизация российского образования в соответствии с Федеральной программой развития образования [1] на ближайшие годы нацелена на глубокую трансформацию существующей системы образования Российской Федерации, что определяет значительную потребность в использовании новых аналитико-информационных инструментов для эффективного управления образовательным процессом на разных уровнях – государственном, вузовском, локальном. Одной из характерных особенностей учебного процесса является информатизация образования, основанная на внедрении новых информационных технологий, ориентированных на оптимальное управление ходом учебного процесса во всех его проявлениях: аудиторной работе студентов, курсовом и дипломном проектировании, самостоятельной работе, научно-исследовательской работе, учебно-методическом обеспечении предметов, составлении расписаний занятий, сбора и анализа информации об успеваемости студентов и уровня преподавания, кадрово-финансовом и административном аспектах деятельности образовательного учреждения [2, 3]. Вместе с тем, современная образовательная практика высшей школы имеет ограниченные возможности поиска и проявления субъектами образовательного процесса собственной индивидуальности, что является следствием противоречия между групповой формой организации обучения по специальностям в вузе и индивидуальным характером усвоения знаний студентом. Алгоритмизированный режим функционирования образовательных институтов предполагает выполнение равных правил, указаний, инструкций, в том числе при попытках алгоритмизировать построение индивидуальных траекторий обучения при помощи

математических методов [4-10]. В этих условиях реализация индивидуальных образовательных траекторий отождествляется с правом студента выбирать образовательные компоненты в ограниченном объеме, что недостаточно для обеспечения условий его полноценного профессионального саморазвития. Одним из направлений преодоления указанных трудностей является разработка современных методик и техник с применением интеллектуальных компьютерных технологий мониторинга результативности, таких, как построение и отслеживание индивидуальной траектории обучения или внедрение игровых технологий в учебный процесс на основе теории управления и интеллектуального анализа данных с применением машинного обучения и математической статистики. Целью исследований является разработка математического представления индивидуального образовательного маршрута обучающегося, на основании которого появляется возможность осуществить достоверный прогноз успешности обучения студента. При таком подходе модель прогноза оперирует не только такими параметрами, как успеваемость и трудоемкость элементов дисциплины, но и включает социально-демографические параметры обучающихся.

2. Формализация и общий алгоритм формирования индивидуального образовательного маршрута обучающегося. В рамках настоящих исследований индивидуальная образовательная траектория Ω_s^N s -го студента ($s=\overline{1, M}$, где M – общее число студентов выборки) на интервале времени всего обучения по учебному плану специализации в ВУЗе $[t_0, t_2]$ представляется математическим объектом, содержащим N независимых параметров. N -й параметр, регистрируемый в момент времени t_2 , характеризует результат итоговой аттестации в соответствии с r -м учебным планом специализации ($r=\overline{1, R}$, где R – общее количество специализаций в ВУЗе).

Параметры индивидуальной образовательной траектории: $(N-1)$, $(N-2)$, 1 регистрируются на интервале реализации учебного плана $[t_0, t_1]$, где $t_1 < t_2$, и представляют собой интегральную параметризованную оценку степени успешности прохождения мероприятий промежуточного контроля, предусмотренного рабочими программами и тематическими планами дисциплин, составляющих r -й учебный план.

Индивидуализация образовательного процесса предполагает, что для каждого обучающегося возможно изменение количества часов на определенные темы дисциплин, при сохранении параметров и структуры учебного плана. Глубиной девиации образовательного процесса в настоящем исследовании принята трудоемкость одной дисциплины. При этом, принцип индивидуализации будет соблюден и в случае варьирования трудоемкости тем, модулей и других элементов рабочих программ или учебного плана. В апостериорном случае, т.е. после завершения обучения, траектория является полностью определенной в каждой точке контрольных мероприятий.

Принцип, лежащий в основе технологии индивидуальной образовательной траектории заключается в параметрической идентификации недоопределенного математического объекта Ω_s (т.е. полученного по данным на интервале $[t_0, t_1]$, где $t_1 < t_2$) на основе множества типовых образовательных траекторий $\{\Omega\}$ с известной степенью успешности завершения образовательного процесса и определенных на всем временном интервале реализации учебного плана $[t_0, t_2]$. Математический объект – многомерная кривая (многомерная, благодаря множеству одновременно регистрируемых параметров учебного процесса). Например, пока студент наблюдается, до его текущего курса математический объект определен, но нам нужно спрогнозировать успешность прохождения дисциплин и аттестации в будущем – там он не доопределен.

Так как смысл технологии индивидуальной образовательной траектории состоит не только в апостериорном распознавании индивидуального маршрута каждого студента, но и в управлении им с целью коррекции и вывода на заданный уровень успешности прохождения итоговой аттестации, то идентификация образовательного маршрута реализуется по его начальному фрагменту в момент t_1 (рисунок 1). Например, по окончании 2-3 семестров наблюдается, к какой группе траекторий принадлежит образец на своем интервале 2-3 семестров, соответственно, к какому итогу по итоговой аттестации приведет его обучение без коррекции. Если прогнозируемый итог не устраивает, то, начиная с момента времени t_1 , необходимо корректировать траекторию за счет изменения последующих трудоемкостей элементов рабочих программ и учебного плана в направлениях, приближающих к необходимой (эталонной) траектории с необходимой степенью успешности итоговой аттестации.

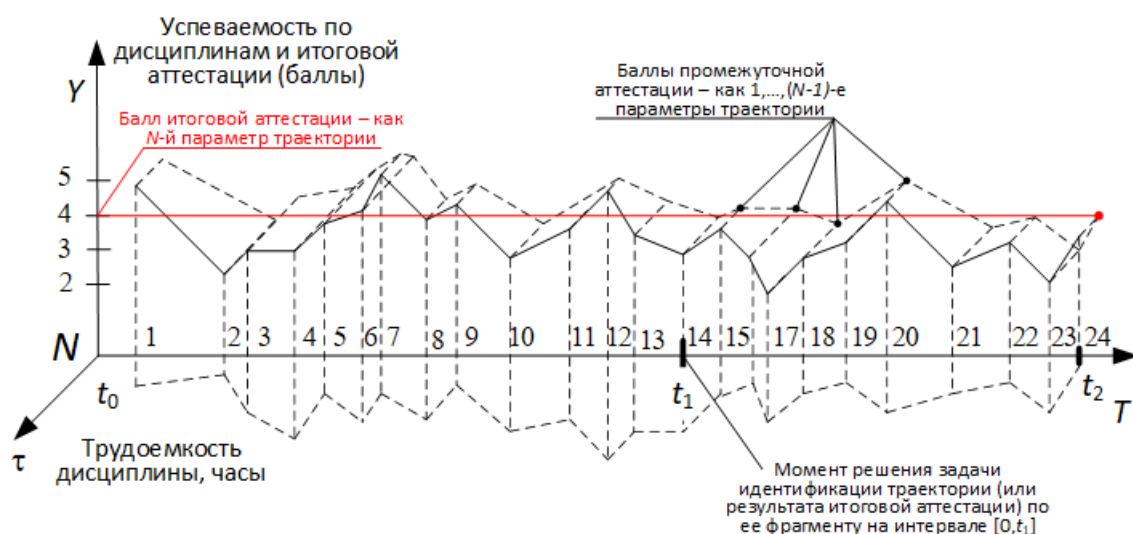


Рис. 1. Геометрическая интерпретация апостериорной образовательной траектории Ω размером $N=24$ в трехмерном пространстве «Дискретное время семестровых контрольных мероприятий-Успеваемость-Трудоемкость»

Коррекция индивидуальной образовательной траектории может осуществляться за счет изменения соотношения часов аудиторных занятий и самостоятельного изучения темы, изменения тематических планов в части практических, лабораторных или лекционных занятий, при сохранении общей трудоемкости дисциплины, а также дисциплин по выбору. Коррекция может быть осуществлена путем приведения оставшейся траектории к типовому эталону заданной степени успешности и специализации траектории, а сами эталоны формируются по выборке данных прошедших обучения студентов.

Таким образом, основные компоненты и операции по формированию индивидуального образовательного маршрута обучающегося включают:

1. Трехмерное пространство $\{X, Y, Z\}$ построения траектории, где ось X – ось времени реализации учебного плана специализации в дискретной шкале отчетных мероприятий по элементам рабочих программ, ось Y – порядковая целочисленная шкала степени успешности прохождения отчетных мероприятий по элементам рабочих программ, ось Z – шкала трудоемкости элементов рабочих программ.
2. Собственно, траектория Ω_s^N s -го студента, представляющая собой вектор: $\Omega_s^N = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$, где y_i , $i=1, \dots, N$ – значение степени успешности прохождения отчетных мероприятий по элементам рабочих программ в момент времени t_i .

Математический объект Ω_s^N представим в виде вектора данных, а при $N \rightarrow \infty$ – кривую в трехмерном пространстве или семейство двух плоских кривых.

3. Для решения задачи идентификации – как решения задачи сличения с известным, необходимо иметь эталонные кривые, представляющие собой алфавит классов различных итогов обучения (или различных степеней успешности обучения по r -му учебному плану специализации в ВУЗе). В свою очередь, для получения таких эталонов необходимо решить задачу кластеризации объектов Ω_s^N в пространстве $\mathbf{R}^{M \times N}$, где M – общее число студентов выборки) на интервале времени всего обучения по учебному плану специализации в ВУЗе $[t_0, t_2]$.

4. Метрика сличения фрагментов кривых траекторий – в общем случае Минковского, с

варьируемыми переменными p и q : $l_p^q(X, A) = \left(\sum_{j=1}^N |x_j - a_j|^p \right)^{\frac{q}{p}}$, где X – сличаемый

образец – фрагмент траектории, A – эталон траектории.

5. Δt_i – коррекция, вычисляемая в часах, которые необходимо добавить или отнять у каждого i -го элемент учебного плана или рабочей программы на интервале $[t_1, t_2]$ для перевода обучающегося на требуемую (эталонную) траекторию.

Общий алгоритм построения и коррекции индивидуальной траектории студента на основе игровых технологий будет выглядеть следующим образом (рисунок 2).

Как видно из рисунка 2, центральным элементом алгоритма является этап идентификации фрагмента траектории, как промежуточных достижений и результатов студента для оценки соответствия траектории заданным параметрам. Достоверность решения задачи идентификации – как отнесения к заданному, зависит от трех составляющих задачи – статистической представительности эталонов (шаблонов) и сличаемых образцов, словаря признаков и алфавита классов.

3. Модель метрической идентификации индивидуального образовательного маршрута обучающегося. Предположим, что по результатам прохождения за время t_1 цикла или модуля, посвященного изучению определённой темы, студент получил оценку y_1 баллов. Тогда образовательная траектория студента за период реализации учебного плана $[t_0, t_1]$ будет представлять собой одну реализацию выборки, подлежащей кластеризации, с целью эталонирования траекторий $\Omega_s^N = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$, где $y_i, i=1, \dots, N$ – степень успешности прохождения игры в части реализации элементов рабочих программ в момент времени t_i .

Цифровые системы управления обучением (LMS) в ВУЗах содержат сведения по студентам гораздо более широкие, чем дискретное время семестровых контрольных мероприятий, текущая успеваемость студента и трудоемкость пройденных дисциплин. Например, в датасетах [11-13] успеваемости студентов в качестве основания для выработки прогноза успешности итоговой аттестации, совместно с данными по рубежным контрольным точкам могут быть использованы такие параметры, как: 1) посещаемость занятий; 2) количество часов работы по неполному рабочему дню студента; 3) количество часов участия во внеклассных мероприятиях; 4) количество часов самостоятельного обучения каждую неделю, и др.; 5) мало вариабельные во времени социо-демографические данные студента; 6) пол (гендер); 7) национальность; 8) размер семьи; 9) состояние здоровья; 10) уровень образования родителей; 11) параметризация рода занятий отца и матери; 12) семейное положение; 13) параметризация карьерных устремлений студента, и др.



Рис. 2. Этапы алгоритма построения индивидуальной траектории студента

Наличие такого количества данных по каждому студенту обуславливает возможность осуществлять прогноз успешности обучения на основе метрической идентификации индивидуального образовательного маршрута не только во времени, но и в пространстве вышеперечисленных, преимущественно неизменных на протяжении всего обучения, характеристик студента (рисунок 3).

Дата	здор.	сем. полож	состав семьи	род. занят.	национа льн.	происхо жд.	раб. день	внеу рочн	сам. подг	Посещ.	Дисц.1	Дисц.2	Дисц.N	ИМЭ	Диплом
08.01.2022							28,07	0,39	64,14	65,26	13,25				
09.01.2022							27,86	0,12	64,89	62,16	13,74				
09.01.2022							28,06	0,20	63,86	55,25	13,74				
12.01.2022							27,78	0,18	65,65	56,01	13,90				
13.01.2022							28,21	0,30	64,74	56,00	13,78				
14.01.2022							28,31	0,16	64,40	56,39	13,43				
16.01.2022							28,24	0,18	64,33	58,04	13,32				
17.01.2022							28,13	0,22	64,67	58,32	13,97	15,22			
18.01.2022							31,90	0,13	67,99	53,01	13,55	14,94			
03.05.2022							28,35	0,41	65,64	58,07	12,96	14,60			
04.05.2022							28,57	0,35	65,63	57,92		14,52			
05.05.2022							28,49	0,40	65,76	56,96		14,47			
06.05.2022							28,40	0,44	65,79	56,97		14,30			
07.05.2022							31,31	0,38	64,81	57,07					
08.05.2022							28,86	0,35	63,97	56,81			15,65		
09.05.2022							26,83	0,35	64,08	57,08			15,69		
10.05.2022							27,09	0,40	64,13	56,64			15,95		
11.05.2022							30,11	0,34	64,60	60,34			15,92		
12.05.2022							29,98	0,36	64,56	59,90			16,74		
13.05.2022							30,07	0,34	64,55	60,08			16,68		
03.06.2022							50,60	0,49	70,19	64,50			16,32		
05.06.2022							50,64	0,32	70,04	62,31			16,46		
			28,49	0,40	65,76	56,96	0,30	64,74		пространственная экстраполяция				4,00	5,00

Рис. 3. Пример топологии исходных данных для реализации индивидуального и группового прогнозирования во времени (освоения элементов учебного плана) и пространстве социо-демографических данных студента (в таблице представлены оценки и баллы)

В результате появляется возможность одновременного применения и комплексирования инструментария, как для распознавания многомерных кривых, построенных по значениям временных отсчетов параметризованных событий учебного плана, так и метрической идентификации в пространстве слабо-вариабельных во времени социо-демографических данных студента.

В случае, если временных отсчетов мероприятий учебного плана в периоде основания прогноза оказывается слишком много или они сильно зашумлены, то альтернативой является замена временного ряда на его статистические моменты, т.е. вторичные признаки.

Протокол наблюдений Ω_1 прецедентов обучающих векторов вида в таком случае будет представлять собой матрицу обучающей выборки вида «временные и пространственные (или вторичные) признаки – класс успешности итоговой аттестации» (1):

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} k_1^1 & \dots & k_{L_k}^1 & v_1^1 & \dots & v_{L_v}^1 & y_1^1 & \dots & y_m^1 & p_1^1 & \dots & p_{L_p}^1 & z_1^1 & \dots & z_{L_z}^1 & q_1^1 & \dots & q_N^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_1^i & \dots & k_{L_k}^i & v_1^i & \dots & v_{L_v}^i & y_1^i & \dots & y_m^i & p_1^i & \dots & p_{L_p}^i & z_1^i & \dots & z_{L_z}^i & q_1^i & \dots & q_N^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_1^L & \dots & k_{L_k}^L & v_1^L & \dots & v_{L_v}^L & y_1^L & \dots & y_m^L & p_1^L & \dots & p_{L_p}^L & z_1^L & \dots & z_{L_z}^L & q_1^L & \dots & q_N^L \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $(n+L_z+N)$ – размер параметрического описания каждого прецедента; L – количество строк матрицы, характеризует объем обучающей выборки; k – параметризованные данные о прогрессе изучения дисциплины студентом; v – переменные промежуточной аттестации; y – переменные посещаемости; p – социально-демографические данные; z – переменные состояния обучающегося (здоровье, психологический скрининг и т.д.); q – переменные итоговой аттестации – прогнозируемые целевые переменные.

Таким образом, прогностическая модель оценки успешности обучения на основе метрической идентификации индивидуального образовательного маршрута включает в себя несколько инструментов экстраполяции (пространственной и временной) в одно общее множество прогнозируемых переменных – баллы мероприятий итоговой аттестации, с последующей мажоритарной обработкой результатов.

В алгоритме комплексирования использовались следующие механизмы вычисления принадлежности классу успешности итоговой аттестации:

- метрические, по критериям минимума а) евклидового расстояния, б) расстояний Чебышёва и Минковского третьей степени;
- статистический на основе рассогласования Кульбака-Лейблера;
- на основе максимума нормированной функции кросскорреляции;
- на основе многослойной нейронной сети (НС) прямого распространения с векторной функцией выхода.

Типовая многослойная НС прямого распространения сигнала имеет архитектуру $\{L, X_1, \dots, X_N, 1\}$, где L – размер входного слоя, $X_1, \dots, X_N$ – размеры скрытых слоев или $\{ML, X_1, \dots, X_N, 1\}$ – при распознавании по M характеристикам учебного процесса (рисунок 4) [14-16].

Идентифицируемая кривая многомерна за счет большого числа регистрируемых параметров учебного процесса, а также характеристик самого студента.

Применение НС (рисунок 4) для обнаружения и классификации фрагмента многомерной кривой, принадлежащей эталонной траектории студента, осуществлялось в соответствии с формулой:

$$y_j = f_j^{[3]} \left(\sum_{m=1}^{n_2} w_{mj}^{[3]} \left(f_m^{[2]} \left(\sum_{h=1}^{n_1} w_{hm}^{[2]} \left(f_h^{[1]} \left(\sum_{i=1}^n w_{ih}^{[1]} x_i \right) \right) \right) \right) \right), j = 1, N, \quad (2)$$

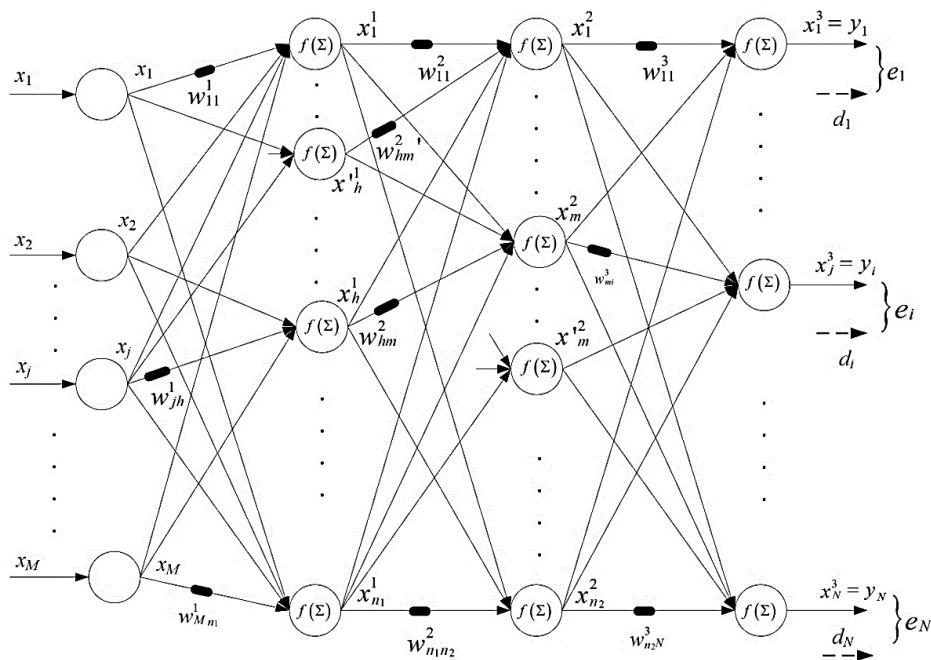


Рис. 4. Типовая многослойная НС для временной экстраполяции
успешности итоговой аттестации

Время на рисунке в неявном виде – каждое значение x_j – это оценка по каким-либо мероприятиям промежуточной аттестации или результатам прохождения игр. Это все процессы – во времени.

Если представить в N -мерном пространстве признаков два сличаемых фрагмента в виде двух точек X и A , то *евклидово расстояние* между ними вычисляется, как

$$l_2(X, A) = \sqrt{(x_1 - a_1)^2 + (x_2 - a_2)^2 + \dots + (x_n - a_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - a_i)^2}. \quad (3)$$

Если евклидово расстояние возвести в квадрат, то при классификации назначаются большие веса более отдаленным друг от друга объектам.

При $\nu \rightarrow \infty$ в формуле $l_\nu^\mu(X, A) = \left(\sum_{j=1}^N |x_j - a_j|^\nu \right)^{\frac{\mu}{\nu}}$, расстояние (по Чебышёву) равно

максимальному отклонению по какой-либо из координат $l_\infty = \max_{1 \leq j \leq N} |x_j - a_j|$, т.е. выбор данной меры расстояния с большой степенью дает резкое выделение класса с наименьшим расстоянием до кривой.

Для оценки степени линейной зависимости двух кривых X и A использовался коэффициент корреляции:

$$r_{xa} = \mu_{xa} / \sigma_x \sigma_a, \quad (4)$$

где σ_x^2 , σ_a^2 – дисперсии, а μ_{xa} – их ковариация (совместная дисперсия). При наличии k наблюдений в каждом фрагменте

$$\mu(X, A) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})(a_i - \bar{a}). \quad (5)$$

В качестве нормированной корреляционной функции применялась:

$$p_I(t_1, t_2) = \frac{K_I(t_1, t_2)}{\sigma_I(t_1)\sigma_J(t_2)} \quad \text{или} \quad p_I(t_1, t_2) = \frac{K_I(t_1, t_2)}{\sqrt{K_I(t_1, t_1)}\sqrt{K_J(t_2, t_2)}}, \quad (6)$$

где I – значения отсчетов кривой образца, J – значения отсчетов кривой эталона.

При обнаружении совпадений двух траекторий взаимная корреляционная функция для двух фрагментов кривых – окна сканируемой последовательности x и шаблона a как коэффициент корреляции между x_t и a_{t+k} в зависимости от номера отсчета k вычислялся параметр:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} X_t A_{t+k} - \sum_{t=1}^{n-k} A_t \sum_{t=1}^{n-k} X_{t+k} / (n-k)}{\sqrt{\left[\sum_{t=k}^{n-k} A_t^2 - \sum_{t=k}^{n-k} A_t^2 / (n-k) \right] \left[\sum_{t=k+1}^n X_t^2 - \sum_{t=k+1}^n X_t^2 / (n-k) \right]}}. \quad (7)$$

Максимальное значение параметра (7) указывает на искомую эталонную реализацию траектории, соответствующую определенному результату на итоговой аттестации.

Статистические методы обнаружения, как и большинство методов распознавания, основаны на гипотезе компактности, согласно которой фрагменты кривых одного класса (образы) более близки друг другу, чем фрагменты кривых разных классов. Расстояние (информационное расхождение, дивергенция – является безразмерной величиной) Кульбака-Лейблера – это метрика между распределениями случайных величин, или расстояние $D_{KL}(P||Q)$ от статистического распределения P значений кривой образца до статистического распределения Q значений кривой шаблона. В непрерывном случае:

$$D_{KL}(P||Q) = \int p(x) \ln(p(x)/q(x)) dx, \quad (8)$$

для дискретного случая:

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_{i=1}^n P_i \ln(P_i/Q_i), \quad (9)$$

где P_i , Q_i – отсчеты значений функции распределения двух кривых.

Так как рассогласование Кульбака-Лейблера между шаблоном и скользящим окном d_{kl}^1 в общем случае не равно рассогласованию между скользящим окном и шаблоном d_{kl}^2 , то для его использования в качестве расстояния применяется показатель $d_{KL} = (d_{kl}^1 + d_{kl}^2)/2$.

4. Экспериментальные исследования. В качестве датасета, примененного для экспериментальных исследований модели прогнозирования успешности обучения, использовалась база данных [12]. Данные содержат 33 параметра, из которых 33-й «G3» – прогнозируемый – результат обучения по математике студентов португальского ВУЗа. 32 и 31-й, «G1» и «G2» – результаты промежуточной аттестации. Датасет содержит сведения по 395 студентам. Таким образом данные позволяют осуществлять прогноз успеваемости как пространственной (по параметрам с 1-го по 30-й), так и временной (в периоде основания параметры – «G1» и «G2») экстраполяцией (рисунок 5). Чем G3 ближе к 20, тем успешнее обучение.

```
school;sex;age;address;famsize;Pstatus;Medu;Fedu;Mjob;Fjob;reason;guardian;traveltime;studytime;failures;schoolsup;famsup;paid;activities;nursery;higher2;internet;romantic;famrel;freetime;goout;Dalc;Walc;health;absences;G1;G2;G3
"GP";"F";18;"U";"GT3";"A";4;4;"at_home";"teacher";"course";"mother";2;2;0;"yes";"no";"no";"no";"yes";"yes";"no";"no";4;3;4;1;1;3;6;"5";"6";6
"GP";"F";17;"U";"GT3";"T";1;1;"at_home";"other";"course";"father";1;2;0;"no";"yes";"no";"no";"yes";"yes";"no";5;3;3;1;1;3;4;"5";"5";6
"GP";"F";15;"U";"LE3";"T";1;1;"at_home";"other";"other";"mother";1;2;3;"yes";"no";"yes";"no";"yes";"yes";"yes";"no";4;3;2;2;3;3;"10";"7";"8";10
"GP";"F";15;"U";"GT3";"T";4;2;"health";"services";"home";"mother";1;3;0;"no";"yes";"yes";"yes";"yes";"yes";"yes";"yes";3;2;2;1;1;5;2;"15";"14";15
"GP";"F";16;"U";"GT3";"T";3;3;"other";"other";"home";"father";1;2;0;"no";"yes";"yes";"no";"yes";"yes";"no";"no";4;3;2;1;2;5;4;"6";"10";10
"GP";"M";16;"U";"LE3";"T";4;3;"services";"other";"reputation";"mother";1;2;0;"no";"yes";"yes";"yes";"yes";"yes";"yes";"no";5;4;2;1;2;5;10;"15";"15";15
"GP";"M";16;"U";"LE3";"T";2;2;"other";"other";"home";"mother";1;2;0;"no";"no";"no";"no";"yes";"yes";"no";4;4;4;1;1;3;0;"12";"12";11
"GP";"F";17;"U";"GT3";"A";4;4;"other";"teacher";"home";"mother";2;2;0;"yes";"yes";"no";"no";"yes";"yes";"no";"no";4;4;1;4;1;1;6;"6";"5";6
"GP";"M";15;"U";"LE3";"A";3;2;"services";"other";"home";"mother";1;2;0;"no";"yes";"yes";"no";"yes";"yes";"yes";"no";4;2;2;1;1;0;"16";"18";19
... ..
```

Рис. 5. Фрагмент датасета «Student Performance»
<https://archive.ics.uci.edu/dataset/320/student+performance>

Целью экспериментов было определить наилучшие метрики и модели, позволяющие получить наиболее достоверный прогноз, а также оценить выигрыш от их комплексирования.

На рисунке 6 представлены результаты распознавания степени успешности итоговой аттестации относительно заранее сформированных эталонных траекторий при различных объемах исходных данных и используемых моделей прогнозирования.

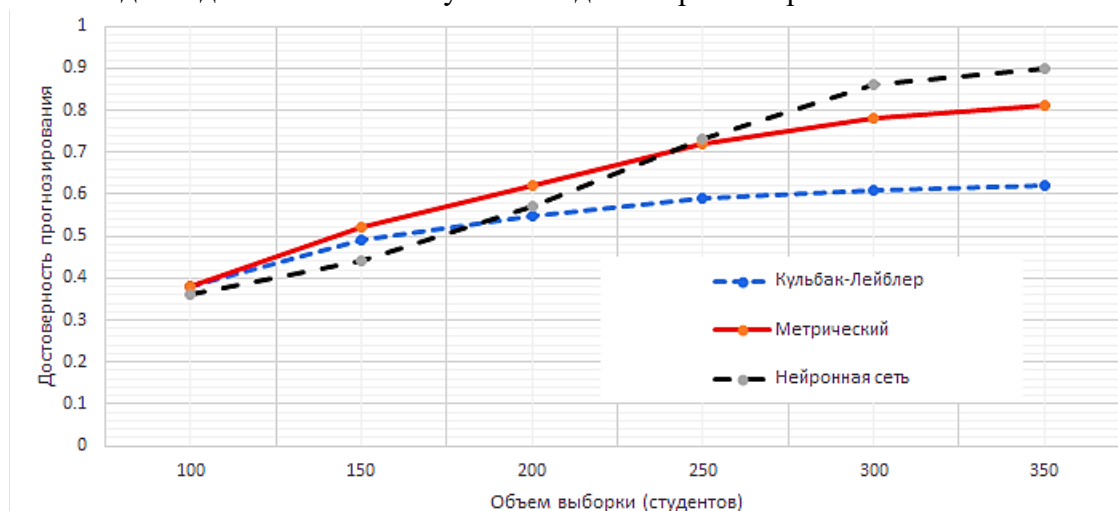


Рис. 6. Зависимость достоверности прогнозирования тремя методами параметра успешности обучения (G33) от объема обучающей выборки

Распознанная траектория однозначно указывала на эталонный прогноз успешности обучения по математике в 3-м (заключительном) семестре. При использовании НС, выборка была поделена на обучающую (от 100 до 350 студентов) и проверочную – 45 студентов.

При использовании метрических (в детерминированной постановке) и статистических моделей для эталонирования кривых образовательных траекторий использовалось различное число студентов. Достоверность прогнозирования рассчитывалась частотным способом:

$$D = M/N, \quad (10)$$

где M - число успешных прогнозов, N – общее число опытов.

Каждый опыт отличался случайным составом примеров обучающей выборки и новым обучением нейронной сети. Низкая достоверность метода на основе сличения функций распределения Кульбака-Лейблера обусловлена зашумленностью данных, т.к. некоторые переменные в датасете сформированы по результатам субъективных оценок при анкетировании. Увеличение достоверности нейросетевого метода можно объяснить учетом нелинейностей при накоплении примеров в данных, а снижение метрического метода (относительного нейросетевого) – погрешностью, обусловленной эталонированием большого числа примеров при сличении с шаблоном.

5. Заключение. В результате проведенных исследований предложено представлять индивидуальную образовательную траекторию в виде математического объекта – многомерного массива ретроспективных и слабо-девиантных данных каждого студента, позволяющего осуществлять как индивидуальное, так и групповое прогнозирование, как во времени – по данным промежуточной аттестации и характеристикам освоенных элементов учебного плана, так и в пространстве социально-демографических данных обучающихся. Такое представление траектории позволяет применить классические метрические (в детерминированной постановке) и статистические методы распознавания фрагментов кривых, эталоны которых однозначно указывают на вид успешности итоговой аттестации студента. Среди экспериментально исследованных методов прогнозирования максимальную достоверность показал метод на основе трехслойной нейронной сети, что позволяет предположить наличие в исходных данных сложных взаимосвязей между

переменными и незамкнутых областей классов успешности обучения в многомерном пространстве разнородных признаков образовательной траектории.

Максимальную достоверность прогноза показывают корреляционные и нейросетевые методы. При этом нейросетевые модели демонстрируют схожую корреляционной точность распознавания взаимозависимостей между переменными при увеличении объема обучающей выборки.

Список источников

1. Государственная программа Российской Федерации «Развитие образования». – URL: <https://docs.edu.gov.ru/document/id/3998> (дата обращения 17.07.2024).
2. Криони Н.К. Инноватика и инновационные образовательные технологии: монография / Н.К. Криони, С.Г. Селиванов, Ф.В. Шарипов. – М.: Редакционно-издательский дом Российского нового университета, 2020. – 296 с.
3. Инновационные образовательные технологии и методы обучения: монография / С.Н. Викжанович, Т.Ю. Четверикова, Е.А. Романова и др. – Saint-Louis, MO: Publishing house science and innovation center, 2014. – 162 с.
4. Носков М.В. Прогностическая модель оценки успешности предметного обучения в условиях цифровизации образования / М.В. Носков, Ю.В. Вайнштейн, М.В. Сомова и др. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования, 2023. – Т. 20. – № 1. – С. 7-19. – DOI: 10.22363/2312-8631-2023-20-1-7-19.
5. Алдунин Д.А. Математическая модель для построения оптимальной индивидуальной образовательной траектории обучающегося при изучении массовых открытых онлайн-курсов / Д.А. Алдунин, Г.Г. Федин // Информационные технологии, 2019. – Том 25. – № 4. – С. 250-256. – DOI: 10.17587/it.25.250-256.
6. Rózewski P., Zaikin O. Integrated mathematical model of competence-based learning-teaching process. Bulletin of the Polish academy of sciences: technical sciences, 2015, no. 1 (63), pp. 245-259, DOI: 10.1515/bpasts-2015-0029.
7. Lin J., Pu H., Li Y. et al. Intelligent recommendation system for course selection in smart education. Procedia computer science, 2018, vol. 129, pp. 449-453, DOI: 10.1016/j.procs.2018.03.023.
8. Kabathova J., Drlik M. Towards predicting student's dropout in university courses using different machine learning techniques. Applied sciences, 2021, vol. 11, no. 7, pp. 137-146, DOI: 10.3390/app11073130.
9. Riestra-González M., del Puerto Paule-Ruiz M., Ortin F. Massive LMS log data analysis for the early prediction of course-agnostic student performance. Computers & education, 2021, vol. 163, pp. 104-108, DOI: 10.1016/j.compedu.2020.104108.
10. Помян С.В. Прогноз результатов успеваемости студентов вуза на основе марковских процессов / С.В. Помян, О.С. Белоконь // Вестник Вятского государственного университета, 2020. – № 4 (138). – С. 63-73. – DOI: 10.25730/VSU.7606.20.057.
11. Cortez P., Silva A.M.G. Using data mining to predict secondary school student performance. Published in proceedings of 5th annual future business technology conference (2022), 2008.
12. Student performance. Available at: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/320/student+performance> (accessed: 11/04/2024).
13. Hasan R. Dataset of student's performance using student information system, moodle and mobile application 'eDify', 2021, DOI:10.5281/zenodo.5591907.
14. Ростовцев В.С. Искусственные нейронные сети. 4-е изд. / В.С. Ростовцев. – СПб.: Лань, 2024. – 216 с.
15. Бишоп К.М. Распознавание образов и машинное обучение / К. М. Бишоп. – СПб.: ООО «Диалектика», 2020. – 960 с.
16. Аггарвал Ч. Нейронные сети и глубокое обучение / Ч. Аггарвал. – СПб.: ООО «Диалектика», 2020. – 752 с.

Гергет Ольга Михайловна. Доцент, доктор технических наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, ведущий научный сотрудник. AuthorID: 115286, SPIN: 9352-4215, ORCID: 0000-0002-6242-9502, gerget@ipu.ru, 117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65,

Степанов Михаил Александрович. Томский политехнический университет, Инженерная школа информационных технологий и робототехники. AuthorID: 167502, mas65@tpu.ru, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 30.

UDC 621.3

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.014

A predictive model for assessing learning success based on metric identification of an individual educational route

Mikhail A. Stepanov¹, Olga M. Gerget²

¹Tomsk polytechnic university “ISHITR”,

Russia, Tomsk, mas65@tpu.ru

²V.A. Trapeznikov institute of control sciences,

Russia, Moscow

Abstract. The article proposes a comprehensive model for assessing the success of learning based on the methods of recognition theory and processing of multidimensional data within the activity-based direction, which includes a wide range of modern teaching methods based on intelligent analysis of student data, his digital footprint, planning elements in educational and methodological complexes and predicting learning outcomes. The learning trajectory is formed as an element-by-element clustering of interconnected sequences of labor intensity, intermediate results of mastering work programs for a large sample of students. A neural network model for predictive extrapolation of learning outcomes has been developed. The results of experimental studies of the model on data samples accumulated in digital learning management systems are presented.

Keywords: individual educational trajectory, spatial extrapolation, parametric identification, learning success prediction, multilayer neural network, metric methods, Kullback-Leibler method

References

1. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii “Razvitiye obrazovaniya” [State program of the Russian Federation “Education Development”]. Available at: <https://docs.edu.gov.ru/document/id/3998> (accessed: 07/17/2024).
2. Krioni, N.K., Selivanov S.G., Sharipov F.V. Innovatika i innovatsionnyye obrazovatel'nyye tekhnologii: monografiya [Innovation and innovative educational technologies: monograph]. M.: Redaktsionno-izdatel'skiy dom Rossiyskogo novogo universiteta [Moscow, editorial and publishing house of the Russian new university], 2020, 296 p.
3. Vikzhanovich S.N., Chetverikova T.Yu., Romanova E.A. et al. Innovatsionnyye obrazovatel'nyye tekhnologii i metody obucheniya: monografiya [Innovative educational technologies and teaching methods: monograph]. Saint-Louis, MO: Publishing house science and innovation center, 2014, 162 p.
4. Noskov M.V., Vainshtein Yu.V., Somov M.V. et al. Prognosticheskaya model' otsenki uspekhov predmetnogo obucheniya v usloviyakh tsifrovizatsii obrazovaniya [Predictive model for assessing the success of subject learning in the context of digitalization of education]. Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov, Seriya: Informatizatsiya obrazovaniya [Bulletin of peoples' friendship university of Russia, Series: informatization of education], 2023, vol. 20, no. 1, pp. 7-19, DOI: 10.22363/2312-8631-2023-20-1-7-19.
5. Aldunin D.A., Fedin G.G. Matematicheskaya model' dlya postroyeniya optimal'noy individual'noy obrazovatel'noy trayektorii obuchayushchegosya pri izuchenii massovykh otkrytykh onlayn-kursov [Mathematical model for constructing an optimal individual educational trajectory of a student when studying massive open online courses]. Informatsionnyye tekhnologii [Information technologies], 2019, vol. 25, no. 4, pp. 250-256, DOI: 10.17587/it.25.250-256..
6. Rózewski P., Zaikin O. Integrated mathematical model of competence-based learning-teaching process. Bulletin of the Polish academy of sciences: technical sciences, 2015, no. 1 (63), pp. 245-259, DOI: 10.1515/bpasts-2015-0029.
7. Lin J., Pu H., Li Y. et al. Intelligent recommendation system for course selection in smart education. Procedia computer science, 2018, vol. 129, pp. 449-453, DOI: 10.1016/j.procs.2018.03.023.
8. Kabathova J., Drlik M. Towards predicting student's dropout in university courses using different machine learning techniques. Applied sciences, 2021, vol. 11, no. 7, pp. 137-146, DOI: 10.3390/app11073130.
9. Riestra-González M., del Puerto Paule-Ruiz M., Ortin F. Massive LMS log data analysis for the early prediction of course-agnostic student performance. Computers & education, 2021, vol. 163, pp. 104-108, DOI: 10.1016/j.compedu.2020.104108.
10. Pomyan S.V., Belokon O.S. Prognoz rezul'tatov uspevayemosti studentov vuza na osnove markovskikh protsessov [Prediction of academic performance of university students based on markov processes]. Vestnik Vyatskogo

- gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Vyatka state university], 2020, no. 4 (138), pp. 63-73, 10.25730/VSU.7606.20.057.
11. Cortez P., Silva A.M.G. Using data mining to predict secondary school student performance. Published in proceedings of 5th annual future business technology conference (2022), 2008.
 12. Student performance. Available at: <https://archive.ics.uci.edu/dataset/320/student+performance> (accessed: 11/04/2024).
 13. Hasan R. Dataset of student's performance using student information system, moodle and mobile application 'eDify', 2021, DOI:10.5281/zenodo.5591907.
 14. Rostovtsev V.S. Iskusstvennyye neyronnyye seti. 4-ye izd. [Artificial neural networks. 4th ed.]. SPb.: Lan' [SPb.: Lan], 2024, 216 p.
 15. Bishop K.M. Raspoznavaniye obrazov i mashinnoye obucheniye [Pattern recognition and machine learning]. SPb.: OOO "Dialektika" [St. Petersburg: OOO "Dialectics"], 2020, 960 p.
 16. Aggarwal C. Neyronnyye seti i glubokoye obucheniye [Neural networks and deep learning]. SPb.: OOO "Dialektika" [St. Petersburg: OOO "Dialectics"], 2020, 752 p.

Gerget Olga Mikhailovna. Associate professor, doctor of technical sciences, V.A. Trapeznikov institute of control sciences of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher. AuthorID: 115286, SPIN: 9352-4215, ORCID: 0000-0002-6242-9502, gerget@ipu.ru, 117997, Russia, Moscow, Profsoyuznaya St., 65.

Stepanov Mikhail Aleksandrovich. Tomsk Polytechnic University, School of information technology and robotics. AuthorID: 167502, mas65@tpu.ru, 634050, Russia, Tomsk, Lenin St., 30.

Статья поступила в редакцию 07.02.2025; одобрена после рецензирования 06.03.2025; принята к публикации 02.05.2025.

The article was submitted 02/07/2025; approved after reviewing 03/06/2025; accepted for publication 05/02/2025.

Информационные системы и технологии

УДК 004.82

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.015

Модель конструктора информационных порталов на основе онтологий предметной области и ресурсов

Лисин Владислав Александрович¹, Сидорова Елена Анатольевна²

¹Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия, vladlisin2@gmail.com

²Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН,
Новосибирск, Россия, lsidорова@iis.nsk.su

Аннотация. в статье представлен подход к разработке конструктора информационных порталов знаний на основе онтологического описания информации. Используется методология построения порталов знаний на основе базовых онтологий и паттернов онтологического проектирования. Конструктор порталов знаний должен обеспечивать end-to-end технологию создания и наполнения специализированного интернет-ресурса и предоставлять ряд интеллектуальных сервисов, таких, как редактор онтологий для моделирования предметной области и ресурсов, инструмент для семантической разметки текстов на основе онтологии и настраиваемый интерфейс. Особенности предлагаемого подхода являются: а) использование базовых онтологий научной предметной области и ресурсов, как фундамент для разработки специализированных онтологий, б) использование онтологий для реализации ключевой функциональности программного обеспечения, связанного с настройкой визуализации данных, навигации и интеллектуального поиска на целевом ресурсе, в) ориентированность платформы на специалистов, не имеющих опыта в программировании и веб-разработке. В статье предложены формальная модель конструктора информационных порталов и модель информационного ресурса, создаваемого с помощью данного конструктора, описаны важные технические решения для поддержки end-to-end технологии. Созданные базовые компоненты технологии продемонстрированы на примере создания двух простых информационных систем.

Ключевые слова: редактор онтологий, онтология ресурсов, редактор страниц, портал знаний, мультимедиа

Цитирование: Лисин В.А. Модель конструктора информационных порталов на основе онтологий предметной области и ресурсов / В.А. Лисин, Е.А. Сидорова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2 (38). – С. 182-198. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.015.

Введение. Доступ к качественным и достоверным данным, возможность их изучения особенно важны в условиях перенасыщенности информацией. Для этих целей создаются специализированные распределенные системы, которые способствуют углубленному изучению предметной области. Одним из методов разработки таких систем является применение онтологий – формального описания предметной области (ПрО), в качестве метакаркаса для систематизации знаний, хранения данных и поддержки аналитических и интеллектуальных сервисов.

В научной сфере такие информационно-исследовательские системы (ИИС) опираются на базовые научные онтологии и паттерны онтологического проектирования (Ontology Design Patterns или ODP) [1-3], которые позволяют сэкономить усилия разработчиков. Этот подход закладывает основу создания экспертно-ориентированной [4] технологии разработки ИИС, когда, с одной стороны, эксперту предоставляются необходимые инструменты для интегрирования экспертных знаний в базу знаний системы, а с другой стороны, появляется возможность создавать собственные ИИС без участия программистов.

В статье предлагается подход к созданию конструктора ИИС, обеспечивающего разработку онтологий и интеграцию разнородных ресурсов в единое информационное пространство, а также настройку визуализации элементов онтологии и базы знаний системы в виде многостраничного сайта.

Дальнейшая структура изложения включает следующие вопросы. В разделе 1 приведен обзор предшествующих работ. В разделе 2 приведена модель конструктора ИИС, описывающая все необходимые компоненты разрабатываемой технологии. В разделе 3 приведены примеры применения конструктора для создания простых ИИС, демонстрирующие основные возможности созданной технологии. В разделе 4 обсуждаются некоторые ключевые возможности и проблемы.

1. История вопроса. Существует много исследований, направленных на создание технологии разработки ИИС на базе онтологий. В работе [5] отмечается, что в настоящее время, несмотря на то, что онтологии используются в большом количестве ИИС, разработчики новых систем сталкиваются с рядом существенных проблем, поскольку эти две области – область разработки онтологий и область разработки программного обеспечения, развивались, как правило, раздельно. Системы, предназначенные для проектирования и разработки программных систем под управлением онтологии, относятся к области *Ontology-Based Software Engineering* [6, 7]. Часто такие системы предоставляют функциональность, схожую с Protégé, поскольку снабжены инструментами разработки и редактирования онтологий.

В рамках данной работы мы развиваем подход, представленный в [8, 9]. Идея этого подхода заключается в организации доступа к систематизированным знаниям и информационным ресурсам конкретной предметной области путем использования онтологии в качестве его концептуальной основы, а также использование различных методик для автоматизации разработки онтологий. В соответствии с предлагаемым подходом авторами были разработаны редактор данных, модули поиска и навигации, автоматического индексирования и классификации данных, а также создан ряд ИИС по различным отраслям науки [10, 11].

При разработке ИИС для предметной области «Фольклор народов Сибири» дополнительно к задачам, связанным с моделированием предметной области, были поставлены задачи: а) семантической разметки текстов, б) поддержки параллельных текстов на разных языках, в) поддержки мультимедийных ресурсов (аудио, видео, графические изображения). В работе [12] было приведено описание подхода к разработке ИИС, в рамках которого система должна обеспечивать создание и поддержку репозитория информационных ресурсов, аннотирование ресурсов на основе предметных онтологий, а также создание и поддержку предметных онтологий на уровне простых операций редактирования и обеспечение доступа к ресурсам и данным.

В данном походе, роли онтологий разделены:

1. Онтология ресурсов – формальное описание коллекции информационных ресурсов, представленных в ИИС; является в некотором смысле метаонтологией представления и визуализации, поскольку формирует основу модели данных для пользовательского интерфейса, навигации и поиска.
2. Предметная онтология – формальное описание сущностей предметной области, которое является основой для аннотирования содержащихся в ИИС ресурсов.

В основу онтологии ресурсов легла формальная модель, созданная для поддержки интеграции, стандартизации и обмена информацией в области культурного наследия – CIDOC-CRM [13]. С помощью «Событий», являющихся основными концептами данной онтологии, выражаются процессы сбора и подготовки фольклорных произведений. Также добавлены некоторые свойства, отсутствующие в оригинальной онтологии CIDOC-CRM, для более естественного представления информации, где некоторые из них импортированы из онтологий FOAF, DBpedia и GeoNames (foaf:firstName, dbo:title, geo:lat, geo:long и т.д.). Несмотря на гибкость используемой модели, возникает ряд проблем при непосредственной реализации функций создания, удаления и редактирования узлов, связанных с загружаемыми

ресурсами. Из-за жесткого ориентирования модели на понятие «Событие», внесение любых изменений в метаинформацию файлов системы становится сложным процессом из-за многочисленных повторяющихся связей.

Модуль предметно-ориентированной разметки параллельного текста [14] обеспечивает как синхронизацию переводного текста с оригиналом (построчно), так и аннотирование специалистом сущностей ПрО в тексте. Модель аннотации текста включает множество «вхождений» элементов онтологии в текст или множество фрагментов, размеченных элементами онтологии – экземплярами классов и отношений. В то же время модель не поддерживала разметку отдельных фрагментов текста – части строк или целых абзацев, а только строк, что было связано с особенностями представления фольклорного текста.

Дальнейшее развитие ИИС заключалось в использовании графовых баз данных для размещения онтологий предметных областей и онтологии ресурсов [15]. Графовые базы данных предоставляют более обобщенную структуру, основанную на модели LPG – Labeled Property Graphs (графы меток и атрибутов) [16]. Элементы онтологий обладают уникальными идентификаторами (URI), позволяющими однозначно идентифицировать их принадлежность. В графовом представлении (LPG) эту функцию берут на себя метки.

Пространство имен соответствующей онтологии также включается в описание вершин графа, что позволяет хранить множество онтологий в одном графе. При этом одни и те же вершины могут одновременно быть частью более чем одной онтологии. На основе LPG была разработана модель трансляции онтологии в графовую базу данных, а также система иерархии онтологий с использованием специальных меток узлов «Secondary» и «Exclude» (онтология, которая не наследуется от других, называется корневой, а метки присваиваются расширенным и ограниченным онтологиям соответственно). Несмотря на предоставляемую гибкость в наследовании онтологий, данный метод негативно влиял на время выполнения запросов к базе данных, сильно нагружая систему, а также затруднял разделение одной онтологии от другой без использования специальных инструментов визуализации данных.

На основе разработанных инструментов была создана электронная коллекция фольклорных материалов [17], собранных в Новосибирской области и опубликованных в период с 1969 по 2021 годов. Данная ИИС поддерживает следующие функции:

- хранение и редактирование репозитория информационных ресурсов;
- аннотирование ресурсов на основе предметных онтологий;
- создание и поддержка предметных онтологий на уровне простых операций;
- обеспечение доступа к ресурсам и данным;
- навигация.

Использование конкретной ПрО при проектировании и создании ИИС предусматривает жесткую структуру модели онтологии ресурсов, а также модулей по интеракции конечных пользователей с системой. Следующим шагом в работе с ИИС становится отход от конкретных предметных областей в пользу адаптивных систем по редактированию онтологии ресурсов, а также детальной настройки элементов системы не ее разработчиками, а ее экспертами. Такой подход рассматривается в работе [18]. Авторы предлагают технологию построения ИИС, ориентированную на экспертов. В данном решении база знаний предоставляет знания о ПрО, в рамках которой будет функционировать система: основные сущности (понятиях и объектах) ПрО, а также связи между ними. К последним относятся знания о связывающих понятия отношениях, а также более сложные зависимости между понятиями ПрО. Следующий шаг в развитии адаптивных систем был предложен в работе [19], которая описывает метод создания автоматически генерируемых адаптивных пользовательских интерфейсов редакторов баз знаний, построенных на основе

онтологического подхода. Эта модель подразумевает использование заранее заданных абстрактных интерфейсных элементов, описывающих конкретные блоки ввода и вывода данных из базы знаний: списки выбора, логические переменные, текстовые поля, кнопки и т.д. Несмотря на гибкость данного решения, настройка лишь одной формы в рамках разработанной системы требует большого количества времени и детальной настройки, что может привести к ошибкам типизации и вводу некорректных данных в базу знаний.

В соответствии с требованиями к конструктору ИИС был составлен список основных задач, содержащий такие пункты как создание модели платформы-конструктора ИСС, обновление общей архитектуры и разработку новых инструментов работы с модулями отображения ресурсов. Разрабатываемая система должна реализовывать следующие функциональные требования:

- создание и редактирование ИИС;
- создание и редактирование web-страниц ИИС;
- создание, редактирование и наследование онтологий;
- загрузка, редактирование и отображение мультимедиа ресурсов;
- семантическая разметка загруженных текстов (в том числе параллельных).

2. Конструктор информационно-исследовательских сред. В основе конструктора информационных сред лежит базовая (основная) онтология ресурсов. Задача этой онтологии заключается в представлении корневых понятий системы в виде ее элементов – связи между файлами, их типами и узлами, к которым прикрепляются данные, а также список поддерживаемых форматов.

Конструктор представляет множество загруженных или созданных в нем онтологий предметных областей в виде иерархии, с которой можно взаимодействовать непосредственно через блок редактора. Блок редактора паттернов обеспечивает редактирование, создание и удаление паттернов соответственно.

Блок семантической разметки работает с реляционной базой данных для хранения связей между конкретными фрагментами текста и сущностями или экземплярами онтологии предметных областей.

Модель конструктора можно формально описать в следующем виде:

$$IE = \langle B ORes, IBOS, PO, OntoEditor, PagesEditor, TextAnnotator \rangle \quad (1)$$

где *BORes* – базовая онтология ресурсов, *IBOS* – иерархия базовых онтологий *PrO*, *PO* – множество онтологических паттернов, *OntoEditor* – редактор онтологий и паттернов, *PagesEditor* – редактор страниц системы (информационной среды), *TextAnnotator* – редактор семантической разметки текстов.

С помощью конструктора создается проект, который представляет собой набор основных визуальных элементов – редакторы онтологий и галерею ресурсов, а также множество настраиваемых страниц, созданных пользователем.

В основе проекта лежит выбранная при его создании основная (корневая) онтология ресурсов, а также множество онтологий предметных областей для разметки текстов и проведения исследовательских работ в предусмотренной области.

Формально, проект описывается системой вида:

$$IS = \langle ORes, OS, MPages, MBs, FPB, FB \rangle \quad (2)$$

где *ORes* – онтология ресурсов, *OS* – множество онтологий предметных областей, *MPages* – множество настраиваемых страницы, *MBs* – множество визуальных элементов,

FPB – функция, которая сопоставляет и задает правила визуализации *PV* элементов онтологий:

$$FPB = MBs \rightarrow (ORes \cup OS) \times PV \quad (3)$$

FB – функция, которая сопоставляет элемент и страницу IS и задает правило визуализации элемента на странице:

$$FB = MBs \rightarrow MPages \times PV \quad (4)$$

2.1. Иерархия онтологий. Иерархия онтологий в ИИС позволяет расширять и ограничивать уже существующие онтологии без необходимости полного дублирования их содержания. С помощью данной функции пользователь может добавлять новые элементы в любую онтологию, представленную в библиотеке конструктора, путем наследования от данной онтологии.

В первой модели для выделения онтологической иерархии используются метки «Secondary» и «Exclude» для отображения расширенной и ограниченной онтологий. Эти метки присваивались всем классам онтологии. В результате апробации системы на нескольких предметных областях был сделан вывод об ее нагруженности и плохой производительности.

Во второй модели механизм иерархии основан на единственном поле в узле онтологии под названием «signature». Это поле хранит в себе массив строк, каждая из которых является URI-меткой определенной онтологии. Пример представлен на рисунке 1.

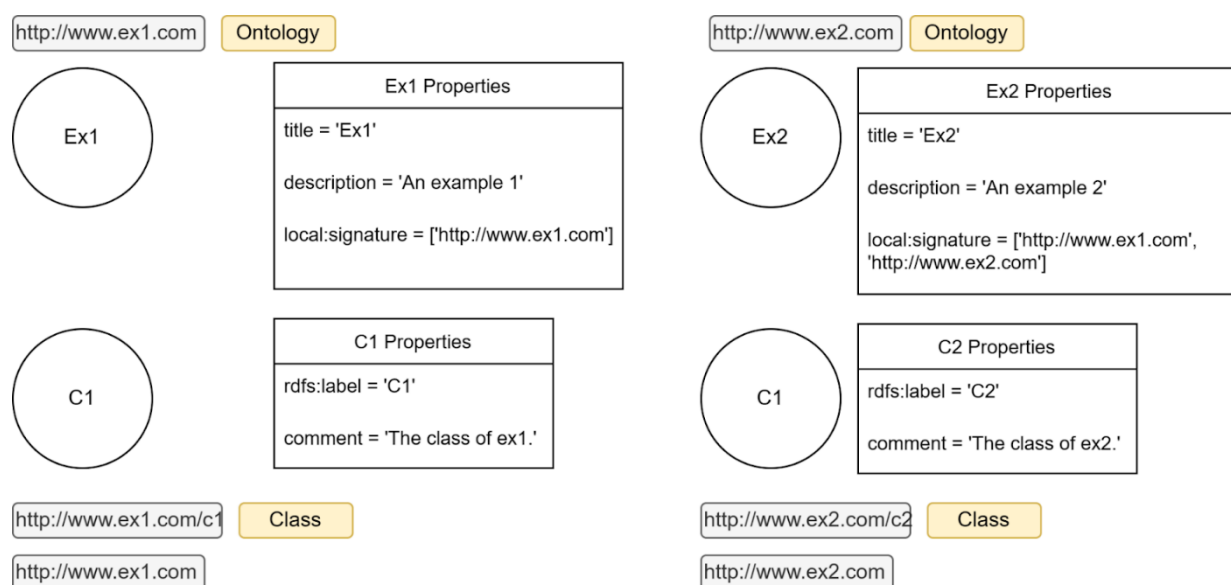


Рис. 1. Пример сопоставляется онтологий узлам графа

В примере (рис. 1) приведена корневая онтология «Ex1» и ее наследник «Ex2».

При запросе элементов определенной онтологии, вместо выполнения запроса по ее URI, выполняется запрос по ее полю «signature». Так как в корневой онтологии данное поле равно ее URI, то при ее запросе будут возвращены только ее элементы.

В случае онтологии «Ex2» ее поле «signature» содержит не только собственный URI, а также URI онтологии «Ex1», поэтому, при запросе элементов онтологии «Ex2», пользователю будут возвращены элементы сразу из двух онтологий.

В результате апробации новой модели было отмечено, что по сравнению с предыдущей версией среднее время запроса к графовой базе данных было ускорено примерно в 1,5 раза.

2.2. Онтология ресурсов. Корневая онтология ресурсов представляет собой мета-онтологию для поддержки интеграции проектов системы и их стандартизации для обмена данными. На основе этой онтологии конечный пользователь имеет возможность построить свою онтологию ресурсов путем наследования компонентов из корневой, тем самым предлагая свою спецификацию мета-онтологии для конкретной предметной области.

Скелет корневой онтологии был разработан на основе CIDOC-CRM [13]. Концептуальная эталонная модель CIDOC (CRM) представляет собой теоретический и практический инструмент для интеграции информации в области культурного наследия. Она позволяет исследователям, администраторам и общественности исследовать сложные вопросы, касающиеся нашего прошлого, в разнообразных и рассредоточенных наборах данных. CIDOC CRM достигает этого, предоставляя определения и формальную структуру для описания неявных и явных понятий и отношений, используемых в документации по культурному наследию и представляющих общий интерес для запроса и исследования таких данных. Такие модели также известны как формальные онтологии. Эти формальные описания позволяют интегрировать данные из нескольких источников независимо от программного обеспечения и схемы.

CIDOC CRM является результатом более чем 20-летней работы по разработке и сопровождению, первоначально проводившейся Рабочей группой по стандартам документации CIDOC, а в настоящее время – группой CIDOC CRM SIG, которые являются рабочими группами CIDOC. С 2006 года он признан официальным стандартом ISO [20].

Графовое представление базовой онтологии ресурсов представлено на рисунке 2.

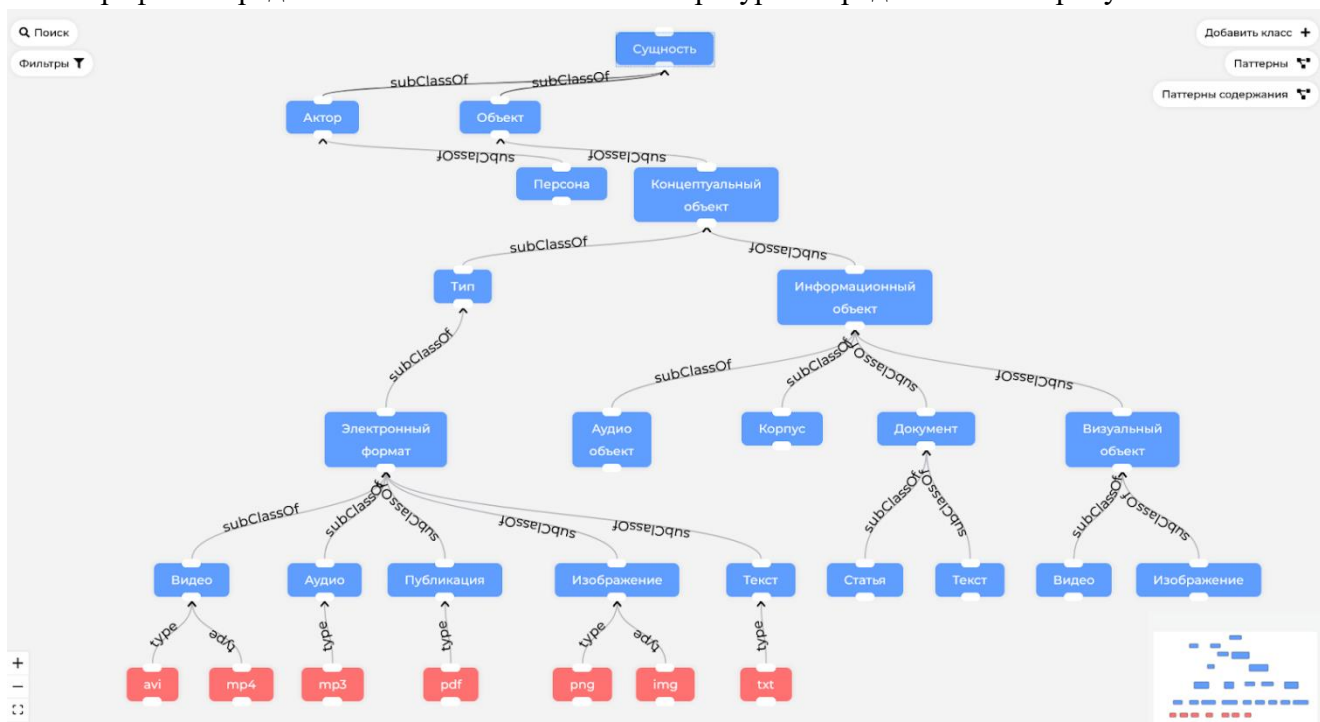


Рис. 2. Базовая онтология ресурсов, основанная на CIDOC-CRM

Для обеспечения поддержки множества предметных областей в онтологии были проведены следующие модификации:

- базовая онтология не содержит концепты для описания временных явлений (Temporal Entities – Event): «Постоянный элемент» убран, Актор и Предмет расположились выше по иерархии;
- класс «Объект» содержит в себе только Концептуальные и Материальные объекты;
- класс Appellation убран в пользу связи Информационный объект -> определяет -> Сущность и атрибута «Файл» класса «Информационный объект»;
- такие классы, как Жанр, Валюта, Меры измерения и т.д. были исключены из базовой онтологии по причине их специфичности.

Базовая онтология ресурсов (метаонтология) представлена на рисунке 2. Свойства подклассов класса «Информационный объект» представлены на рисунке 3.

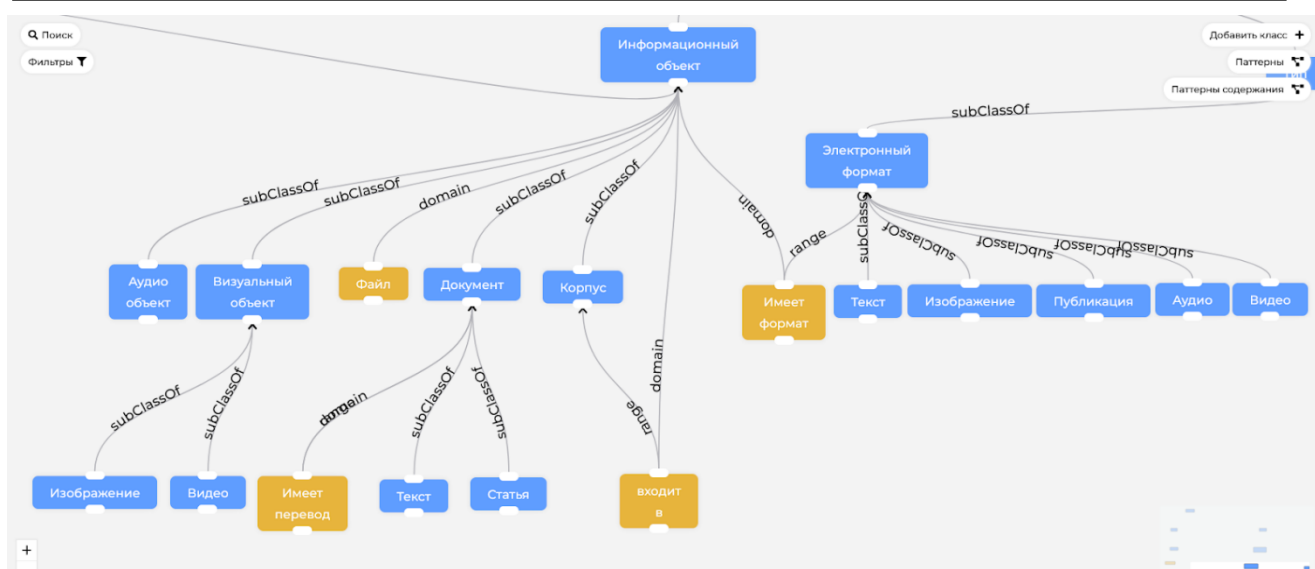


Рис. 3. Свойства подклассов класса «Информационный объект»

2.3. Семантическое аннотирование ресурсов. Для внедрения системы семантической разметки, а также для разработки системы визуализации мультимедиа элементов онтологии ресурсов в основной онтологии ресурсов была создана сущность «Корпус».

Термин «Корпус текстов» используется в мировой лингвистике на протяжении многих лет. В широком смысле под этим термином понимают группу текстов, собранных и организованных в соответствии с какой-либо целью или замыслом. В частном случае под замыслом понимают использование корпуса в качестве базы для исследования того или иного языка: статистического анализа, проверки статистических гипотез и подтверждения лингвистических правил

Сущность «Корпус» является наследником класса «Информационный объект», так же, как и сущность «Документ». Сущность «Документ» включает подкласс «Текст», который хранит в себе файлы формата txt. Сущность «Документ» может определять любой класс мультимедийных объектов, и связь «Входит в» привязывает данные объекты непосредственно к корпусу.

Помимо сущности «Текст», были созданы сущности, корреспондирующие к каждому типу мультимедиа объектов: «Статья», «Видео», «Изображение», «Аудио объект».

Структура созданных классов относительно корневой онтологии представлена на рисунке 3.

2.4. Конструктор страниц. Конструктор страниц представляет собой набор инструментов, предназначенный для создания и редактирования специальных страниц ИИС. Его основная функция заключается в предоставлении конечным пользователям возможности полноценной кастомизации их проекта.

Под кастомизацией в данном случае понимается процесс изменения внешнего вида и функциональности веб-страниц, с целью сделать их более индивидуальными и удобными для пользователей.

Конструктор разделен на следующие структурные элементы (рисунок 4):

- проект,
- страница,
- блок.

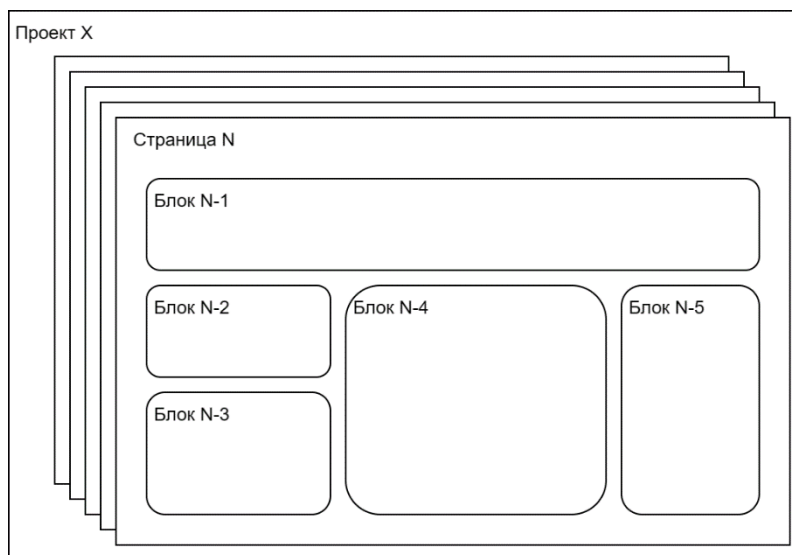


Рис. 4. Структурная модель ИИС

«Проект» представляет собой объект, хранящий ключевую информацию об информационном портале. Он включает в себя список онтологий предметных областей, название и описание проекта, а также ссылку на унаследованную онтологию ресурсов для хранения и представления мультимедиа материалов.

«Страница» – часть «проекта», состоящая из «блоков».

«Блок» – объект, описывающий определенный функциональный элемент. Описание содержит координаты элемента на странице, а также информацию, специфичную для соответствующего типа блока.

Типы блоков: список, мозаика, изображение, слайд-шоу, текст.

Конфигурация блока представлена в листинге 1.

Листинг 1. Конфигурация блока

```

TPageBlock = {
  page_id: number,
  id?: number,
  block_type: 'text' | 'card_list' | 'bullet_list' | 'media' | 'media_slide_show',
  list_uri?: '',
  x: number,
  y: number,
  h: number,
  w: number,
  data?: {
    // picture
    picture_data?: string,
    // text
    text?: string,
    font_size?: number,
    font_weight?: boolean,
    ontology_uri?: string,
    // card_list - bullet list
    class_uri?: string,
    class_attributes?: string[],
  }
}
    
```

В данном листинге используются следующие обозначения: x, y, h, w – координаты блока на странице и его ширина и высота; picture_data – ссылка на изображение блока «медиа»; text, font_size, font_weight – текст, размер шрифта и жирность шрифта блока «text»; ontology_uri, class_uri, class_attributes – ссылка на онтологию; ссылка на класс и список отображаемых атрибутов для блока типа «список» или «мозаика».

С помощью данного инструмента можно создавать такие страницы, как списки услуг или сотрудников, главные страницы или страницы контактов организации, а также галереи для просмотра мультимедиа файлов проекта.

2.5. Авторизация. Авторизация пользователей системы реализована с помощью инструмента VK ID [21]. VK ID представляет собой платформу, обеспечивающую быструю интеграцию форм входа в произвольный разрабатываемый сервис. Процесс авторизации заключается в получении уникального идентификатора пользователя от платформы VK, совместно с его инициалами. Далее полученные данные записываются в объект *Account*, унаследованный от модели *Пользователь* фреймворка *Django*, для которого автоматически генерируется почтовый ящик и пароль. Генерация пароля не влияет на процесс авторизации, так как его ключом является токен, полученный со стороны VK ID.

3. Экспериментальное исследование. Для апробации новой информационной структуры был создан тестовый корпус «Поэты» и наполнен примерами статей, видеоматериалами и стихотворениями для разметки.

3.1. Наследование от корневой онтологии ресурсов. Наследование онтологии ресурсов «Поэты (рес.)» осуществляется от корневой онтологии ресурсов (метаонтологии) (рисунок 5).

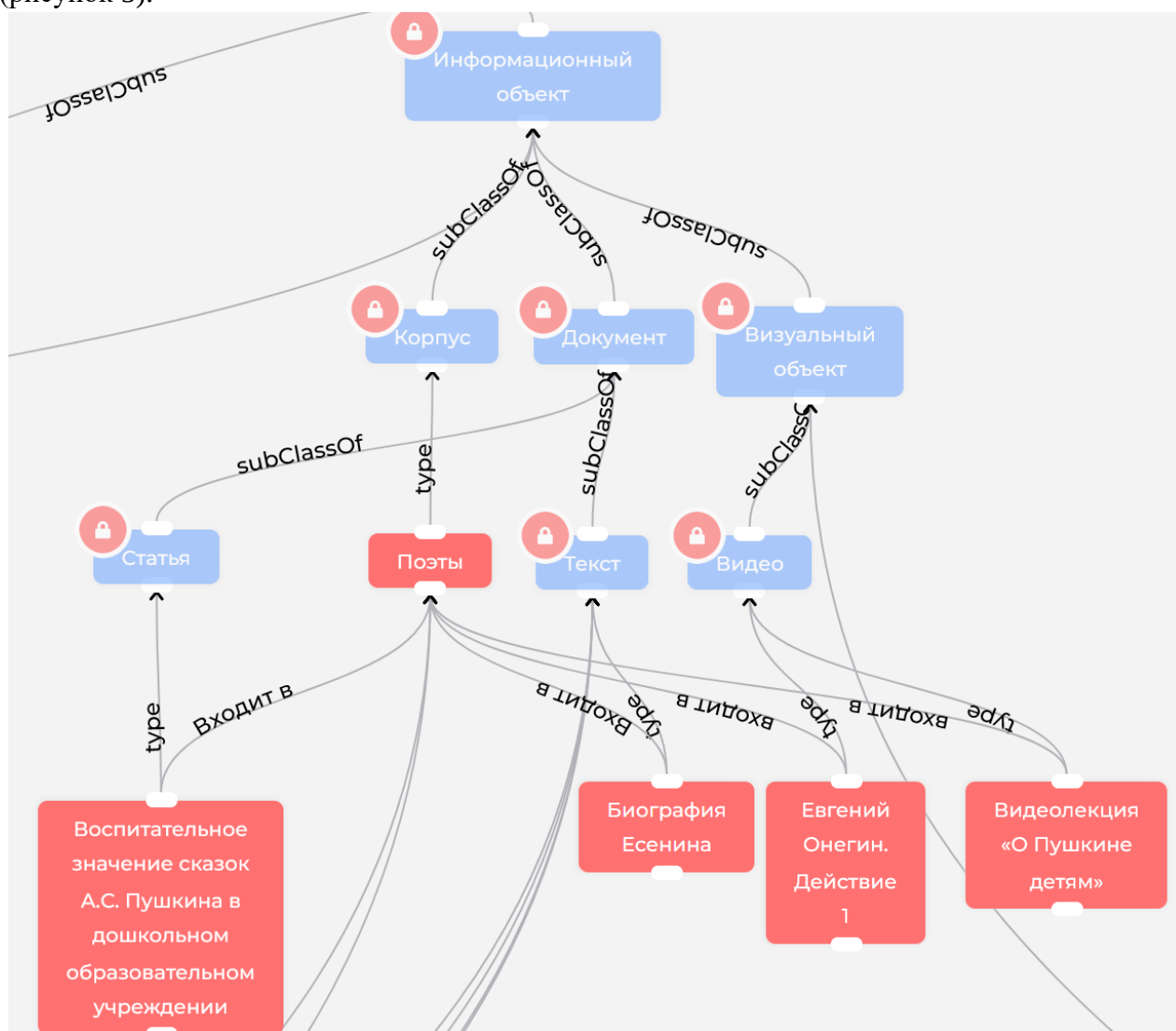


Рис. 5. Визуализация механизма наследования онтологии

На рисунке 5 представлено, как в графическом интерфейсе текущая онтология (Поэты) отделяется от коневой посредством меток замка и регулировкой цветовой палитры.

3.2. Создание ИИС и настраиваемых страниц. Процесс создания нового ресурса заключается в выборе пользователем необходимых онтологий ПрО, а также онтологии ресурсов (метаонтологии), на основе которых будет построена структура системы. Форма создания нового информационного ресурса представлена на рисунке 6.

Проект

Название: Поэты

Онтологии ресурсов: ☐ Онтология ресурсов ☒ Поэты(рес.)

Онтологии: ☐ Базовая ☒ Поэты ☐ Ассистенты ☐ Компьютерная лингвистика (база) ☐ Компьютерная лингвистика

Рис. 6. Форма создания нового информационного ресурса

Для визуализации ресурсов корпуса была создана и добавлена настраиваемая страница «Поэты». На рисунке 7 представлена страница настройки отображения каталога загруженных ресурсов.

Тексты: Поиск Биография Есенина Онегин (рус)

Статьи: Поиск Воспитательное значение сказок А.С. Пушкина в дошкольном возрасте

Видео: Поиск Евгений Онегин. Действие 1

Список

Онтология: Ассистенты (рес.)

Класс: Текст

Параметры: Поиск

☐ Файл ☒ Описание

Выбрано (1)

Рис. 7. Каталог ресурсов созданного проекта

На данной странице пользователь с помощью шести функциональных блоков (трех блоков типа «Текст» и трех блоков типа «Список») обеспечил отображение списков текстов, видеоматериалов и статей. При настройке отображения блока «Текст» с помощью формы, представленной на рисунке 7, были выбраны параметры визуализации на основе онтологических свойств.

3.3. Семантическая разметка текстов. За основу модели инструмента для семантической разметки было взято решение, разработанное в 2021 г. при создании системы «Веб-платформа для фольклорных исследований на основе онтологии предметных областей» [10].

Для поддержки аннотирования и отображения параллельных текстов в класс «Текст» был добавлен атрибут «Имеет перевод», связывающий тексты на разных языках.

В функциональные блоки были добавлены специальные ссылки для перехода на страницу аннотирования текстов. Эти ссылки отображаются только в файлах формата txt и определяют, какой из двух связанных текстов является основным. Для примера, если конечный пользователь системы откроет текст «Онегин (англ.)», то данный текст будет использован для аннотирования, имея текст «Онегин (рус.)» в качестве параллельного. Также предусмотрен обратный вызов.

На рисунке 8 представлены фрагменты размеченного текста с подсветкой различных связей.

0	Всего , что знал еще Онегин Евгений ,	0	Всего , что знал еще Онегин Евгений ,	0	Всего , что знал еще Евгений ,
1	Пересказать мне недосуг;	1	Пересказать мне недосуг;	1	Пересказать мне недосуг;
2	Но в чем он истинный рождение был гений ,	2	Но в чем он истинный имеет характеристику был гений ,	2	Но в чем он истинный был гений ,
3	Что знал он тверже всех наук ,	3	Что знал он тверже всех наук ,	3	Что знал он тверже всех наук ,
4	Что было для него измлада	4	Что было для него измлада	4	Что было для него измлада
5	И труд и мука и отрада ,	5	И труд и мука и отрада ,	5	И труд и мука и отрада ,
6	Что занимало целый день	6	Что занимало целый день	6	Что занимало целый день
7	Его тоскующую лень , -	7	Его тоскующую лень , -	7	Его тоскующую лень , -
8	Была наука страсти нежной ,	8	Была наука страсти нежной ,	8	Была наука страсти нежной ,
9	Которую воспел Назон страдалец умер ,	9	Которую воспел Назон страдалец ,	9	Которую воспел Назон умер ,
10	За что страдалцем кончил он	10	За что страдалцем кончил он	10	За что страдалцем кончил он
11	Свой век блестящий и мятежный	11	Свой век блестящий и мятежный	11	Свой век блестящий и мятежный
12	В Молдавии , в глуши степей ,	12	В Молдавии , в глуши степей ,	12	В Молдавии , в глуши степей ,

Рис. 8. Фрагменты размеченного текста с визуализацией связей

Также была реализована функция по стандартному аннотированию текстов, не имеющих перевода.

На рисунке 9 изображен процесс привязки сущности или экземпляра к фрагменту текста. Процесс привязки включает в себя выделение фрагмента размечаемого текста и активации формы выбора элемента онтологии, который необходимо связать с этим фрагментом. Форма разделена на несколько типов элементов онтологии: классы, объекты и именные связи. Блоки выбора классов, объектов и связей содержат функции полнотекстового поиска.

3.4. Визуализация мультимедиа ресурсов. Для просмотра мультимедиа был создан новый функциональный компонент, подстраиваемый под отображаемый им тип файла. Под самим файлом находится его описание в соответствии с информацией в его узле в онтологии ресурсов. На рисунке 10 представлены примеры визуализации статьи, видео и текста соответственно.

3.5. Универсальность конструктора. Для демонстрации универсальности разработанной системы был создан дополнительный проект, предметная область которого содержит информацию о сотрудниках, их проектах и публикациях лаборатории Искусственного интеллекта Института систем информатики СО РАН.

Для загрузки данных были созданы 3 новых класса в унаследованной онтологии ресурсов: *Сотрудник*, *Публикация*, *Проект*. Структура классов представлена на рисунке 11.

Режимы

Просмотр

Разметка

Выбор онтологии

Ассистенты

Выбор раз

Onegin

Страница:

1

Число строк на странице:

50

Всего

Оригинальный текст

0	Discuss of all Onegin's virtues
1	(No doubt) will take too much time ,
2	But which of these had made a fortune ,
3	What were his beliefs in the prime?
4	What was for him from infant's years
5	The work , the suffer and the rest ,
6	What occupied him all the day
7	Besides the melancholic stay?

Класс

Объект

Связь

Класс

Поиск

Персонаж

Объект

Характеристика

Персонаж

Объект

Поиск

Не указано

Мечта

Душа

Не указано

СОХРАНИТЬ

Рис. 9. Фрагмент текста и форма выбора типа элемента онтологии для связи

Жаркова Ольга Ивановна

МБДОУ ДС № 97 «Аисты»

г. Старый Оскол

ВОСПИТАТЕЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ СКАЗОК А.С. ПУШКИНА В СТАРШЕМ ДОШКОЛЬНОМ ВОЗРАСТЕ

Для чтения А.С. Пушкина точно осекает мысль о русском национальном поете. В своем детстве, никто из поэтов наших не читал его и не может более называться национальным, это право решительно принадлежит ему. В нем, как будто в лексиконе заключилось все богатство, сила и глубина нашего языка. Он более всех и далее всех

Объект: Воспитательное значение сказок А.С. Пушкина в дошкольном образовательном учреждении

Название

Воспитательное значение сказок А.С. Пушкина в дошкольном образовательном учреждении

Importance of Pushkin literature in schools

Описание

Описание

Файл

Скачать

Определяет

Не указано

Евгений Онегин. Действие 1

Название

Евгений Онегин. Действие 1

Onegin Theater

Описание

Описание

Файл

Скачать

Определяет

Не указано

Имеет формат

Не указано

Биография Есенина

Название

Биография Есенина

Esenin's biography

Описание

Описание

Файл

Скачать

Определяет

Не указано

Имеет формат

Не указано

Рис. 10. Пример отображения содержания статьи, видеоматериала и текста

Класс: Сотрудник

Название

ru Сотрудник

en Employee

Описание

Сотрудник ИСИ СО РАН

Атрибуты

Имя

Строка

Фамилия

Строка

Отчество

Строка

Возраст

Строка

Образование

Строка

Должность

Строка

Отношения

Класс: Сотрудник

Узел

Работал в

Проект

Написал

Статья

Класс: Проект

Название

ru Проект

en Project

Описание

Проект Института системы информатики

Атрибуты

Строка

Сайт

Строка

Строка

Отношения

Класс: Проект

Узел

Определяет

Сущность

Имеет формат

Электронный формат

входит в

Корпус

Класс: Публикация

Название

ru Публикация

en Publication

Описание

Публикация

Атрибуты

Строка

Год

Строка

Издательство

Строка

Страницы

Строка

Строка

Отношения

Класс: Публикация

Узел

Имеет формат

Электронный формат

Ссылается на

Проект

Написана

Сотрудник

Рис. 11. Интерфейс редактирования объектов классов онтологии

В систему была загружена информация о 10 сотрудниках, 10 проектах и 32 публикациях. Для каждого класса с помощью конструктора страниц были созданы персонализированные страницы. Страница «Сотрудники лаборатории» представлена на рисунке 12.

«Информационные и математические технологии в науке и управлении» 2025 № 2 (38)

193

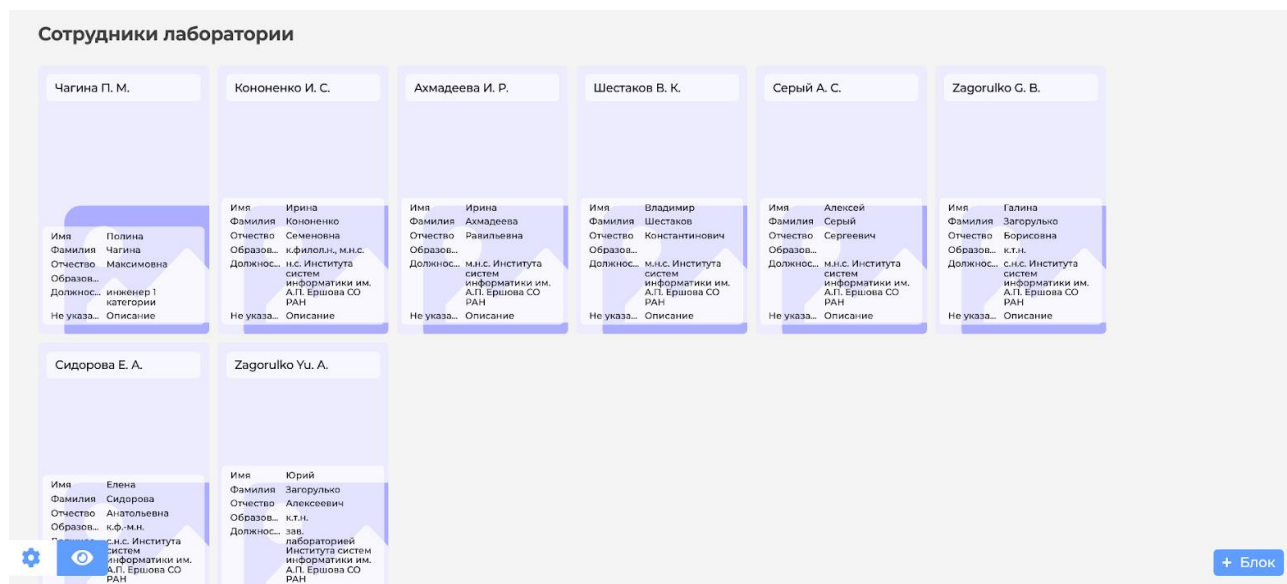


Рис. 12. Страница «Сотрудники»

4. Обсуждение результатов. В представленной статье авторы пытаются решить ряд сложных методологических проблем.

Первая проблема – обеспечение end-to-end конструирования систем, – широко известна и имеет множество решений, таких, как WordPress или Squarespace. Приведенные технологии, несомненно, предоставляют пользователям широкий набор инструментов для создания и редактирования web-ресурсов, не требуя от них глубоких знаний в программировании. Несмотря на это, данные решения используются и предназначены для малых и одностраничных приложений, ориентированных на бизнес-продукты, такие, как продажа, реклама малых бизнесов или персональные блог-страницы. Авторами предлагается решение именно для класса ИИС, основанных на онтологиях, для проведения исследований в конкретных предметных областях. Ключевыми компонентами такого решения являются механизмы повторного использования базовых онтологий и применения иерархий на онтологиях, а также принципиальная возможность создания и внедрения библиотеки паттернов онтологического проектирования.

Вторая проблема – семантическая связь ресурсов и предметных понятий. Типовым решением является описание мета-параметров ресурса: *автор, дата создания, тематика* и т.п., но не анализ содержания. Многие ресурсы обладают собственным богатым содержанием: тексты, видео, аудио. Авторы разработали систему семантического аннотирования для текстов, связывающую фрагменты текста с соответствующими сущностями и экземплярами прикрепленных онтологий.

И, наконец, проблема конструирования многостраничного ресурса с индивидуальными настройками визуализации. Ранее в [14, 15] рассматривались только локальные настройки визуализации сущностей ПрО. В данной работе предложено более универсальное решение, позволяющее в рамках структурной модели сайта связать страницу с онтологическим классом(ами) и выбрать способы визуализации онтологических элементов.

Недостатки предложенного решения заключаются в громоздкости представления данных для больших онтологий. Эта проблема распространяется на все решения, основанные на визуализации больших графов. Решение может быть связано с реализацией «умной» свертки подграфов, а также с улучшением алгоритмов изначального позиционирования узлов. В итоге, необходимо достичь компромисса между детальной визуализацией всех элементов

онтологии на графе и имплементации плавного, отзывчивого и дружелюбного интерфейса для конечных пользователей системы.

Заключение. Целью работы является создание конструктора ИИС, обеспечивающего разработку онтологий и интеграцию разнородных ресурсов в единое информационное пространство, а также настройку визуализации элементов онтологии и базы знаний системы в виде многостраничного сайта. В статье приведены описания подхода, модели ИИС, модели иерархии онтологий, а также примеры апробации разработанной системы для двух предметных областей с примерами разметки текстов, визуализации онтологий в виде интерактивных графов, а также примеров персонализировано-настроенных блоков интерфейса с помощью созданного конструктора страниц.

В будущем планируются оптимизация и улучшение алгоритмов визуализации графов онтологий, разработка библиотеки онтологических паттернов и использование методов RAG (Retrieval Augmented Generation) для реализации поиска с помощью языковых моделей.

Список источников

1. Gangemi A., Presutti V. *Ontology design patterns*. Handbook on ontologies, Springer, 2009, pp. 221-243, DOI: 10.1007/978-3-540-92673-3_10.
2. Загорулько Ю.А. Применение паттернов онтологического проектирования при разработке онтологий научных предметных областей / Ю.А. Загорулько, О.И. Боровикова, Г.Б. Загорулько // Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных: сборник научных трудов XIX Международной конференции DAMDID/RCDL'2017. – Москва: ФИЦ ИУ РАН, 2017. – С. 332-340.
3. Ломов П.А. Применение паттернов онтологического проектирования для создания и использования онтологий в рамках интегрированного пространства знаний / П.А. Ломов // Онтология проектирования, 2015. – Т. 5, – № 2(16). – С. 233-245. – DOI:10.18287/2223-9537-2015-5-2-233-245.
4. Дрождин В.В. Экспертно-ориентированный подход к разработке прикладного программного обеспечения / В.В. Дрождин, М.В. Жуков // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: Сб. статей IX Междунар. научно-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2009. – С. 131-135.
5. Alobaid A., Garijo D., Poveda-Villalón M., et al. Automating ontology engineering support activities with OnToology. *Journal of Web semantics*, 2019, no. 57, pp. 100472, DOI:10.1016/j.websem.2018.09.003.
6. Isotani S., Bittencourt I.I., Barbosa E.F., et al. Ontology driven software engineering: a review of challenges and opportunities. *IEEE Latin America transactions*, 2015, no. 13(3), pp. 863-869, DOI: 10.1109/TLA.2015.7069116.
7. Хорошевский В.Ф. Проектирование систем программного обеспечения под управлением онтологий: модели, методы, реализации / В.Ф. Хорошевский // Онтология проектирования, 2019. – Т. 9. – № 4(34). – С. 429-448.
8. Zagorulko Y.A., Zagorulko G.B. Experience of using content patterns in the development of Ontologies of scientific subject areas. *Pattern recognition and image analysis*, 2023, vol. 33, iss. 3, pp. 560-567, DOI:10.1134/S1054661823030513.
9. Загорулько Ю.А. Программный комплекс для разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений в слабоформализованных областях / Ю.А. Загорулько, Г.Б. Загорулько, А.С. Серый и др. // Наука и технологии Сибири. Сибирская индустрия информационных систем, 2023. – № 10. – С. 34-38.
10. Sapetina A., Kulikov I., Zagorulko G., et al. Constructing an expert system for solving astrophysical problems based on the ontological approach. *Parallel computational technologies, communications in computer and information science*, Springer, 2022. vol. 1618, pp. 30-42, DOI:10.1007/978-3-031-11623-0_3.
11. Zagorulko Y., Borovikova O., Zagorulko G. Knowledge portal on computational linguistics: content-based multilingual access to linguistic information resources. *Selected topics in Applied computer science. Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Applied Computer Science (ACS'10)*. Hamido Fujita, Jun Sasaki (Eds.), WSEAS Press, 2010, pp. 255-262.
12. Серый А.С. Подход к построению информационной исследовательской среды для анализа научных материалов и создания аннотированных корпусов / А.С. Серый, А.А. Гриневич, В.А. Лисин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 4(24). – С. 68-76.
13. CIDOC Conceptual reference model, available at: <http://www.cidoc-crm.org/> (accessed: 12/01/2021).
14. Лисин В.А. Веб-платформа для фольклорных исследований на основе онтологии предметных областей / В.А. Лисин, Е.А. Сидорова // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии, 2021. – Т. 19. – № 2. – С. 53-64.

15. Лисин В.А. Модель представления онтологии предметных областей на основе графовых баз данных / В.А. Лисин, А.С. Серый, Е.А. Сидорова // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии, 2022. – Т. 20. – № 4. – С. 24-38. – DOI: 10.25205/1818-7900-2022-20-4-24-38.
16. Jesús Barrasa RDF Triple stores vs. Labeled property graphs: what's the difference? available at: <https://neo4j.com/blog/rdf-triple-store-vs-labeled-propertygraph-difference> (accessed: 01/13/2023).
17. Гриневич А. Анализ культурных универсалий фольклора народов Сибири и Дальнего Востока / А. Гриневич, А. Серый // Материалы XXIII Международной конференции по аналитике и управлению данными в информационно емких областях (DAMDID/RCDL 2021). CEUR, 2021. Vol. 3036. P. 387–401.
18. Загоруйко Ю.А. Семантическая технология разработки интеллектуальных систем, ориентированная на экспертов предметной области / Ю.А. Загоруйко // Онтология проектирования, vol. 5, no. 1 (15), 2015. – С. 30-46.
19. Грибова В.В. Онтологии для разработки и генерации адаптивных пользовательских интерфейсов редакторов баз знаний / В.В. Грибова, С.В. Паршкова, Л.А. Федорищев // Онтология проектирования, 2022. – Т. 12. – № 2(44). – С. 200-217. – DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-2-200-217.
20. CIDOC-CRM ISO page, available at: <https://www.iso.org/standard/57832.html> (accessed: 12/01/2021).
21. VK ID. Resource. – URL: <https://id.vk.com/about/business> (дата обращения: 01.07.2024).

Лисин Владислав Александрович. Аспирант Новосибирского Государственного Университета, программист второй категории Института Систем Информатики СО РАН. AuthorID: 1170641, SPIN: 3572-8093.

Сидорова Елена Анатольевна. К.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории искусственного интеллекта Института систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН (Новосибирск), доцент кафедры программирования и кафедры систем информатики Новосибирского государственного университета. Основные направления исследований связаны с компьютерной лингвистикой, анализом аргументации, онтологическим инжинирингом и разработкой интеллектуальных систем. Author ID: 146000, SPIN: 3674-4380, ORCID: 0000-0001-8731-3058, lsidorova@iis.nsk.su, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6.

UDC 004.82

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.015

Model of the information portal designer based on the ontologies of the subject area and resources

Vladislav A. Lisin¹, Elena A. Sidorova²

¹Novosibirsk State University,
Novosibirsk, Russia, vladlisin2@gmail.com

²Institute of Systems Informatics A.P. Ershov SB RAS,
Novosibirsk, Russia

Abstract. The article presents an approach to developing a constructor of information knowledge portals based on an ontological description of information. The applied methodology is for constructing knowledge portals based on basic ontologies and ontological design patterns. The constructor of knowledge portals should provide end-to-end technology for creating and filling a specialized Internet resource, as well as a number of intelligent services, such as an ontology editor for modeling the subject area and uploaded resources, a tool for semantic markup of texts based on an ontology and a customizable interface. The peculiarity of the proposed approach is a) the use of basic ontologies of the scientific subject area and resources as a foundation for developing specialized ontologies, b) the use of ontologies to implement the key functionality of the software associated with setting up data visualization, navigation and intelligent search on the target resource, c) putting focus on specialists who do not have experience in programming or web development. This paper proposes a formal model of a constructor of information portals and a model of an information resource created using this designer, and describes important

technical solutions to support the end-to-end technology. The created basic components of the technology are demonstrated using the example of creating a simple information system.

Keywords: ontology editor, resource ontology, page editor, knowledge portal, multimedia

References

1. Gangemi A., Presutti V. Ontology design patterns. Handbook on ontologies, Springer, 2009, pp. 221-243, DOI: 10.1007/978-3-540-92673-3_10.
2. Zagorulko Yu.A., Borovikova O.I., Zagorulko G.B. Application of ontological design patterns in the development of ontologies of scientific subject areas [Primenenie patternov ontologicheskogo proektirovaniia pri razrabotke ontologii` nauchny`kh predmetny`kh oblastei`]. Analitika i upravleniye dannymi v oblastiakh s intensivnym ispol'zovaniyem dannykh: sbornik nauchnykh trudov XIX Mezhdunarodnoy konferentsii DAMDID/RCDL'2017 [Analytics and data management in data-intensive areas: collection of scientific papers of the XIX International Conference DAMDID/RCDL'2017], Moscow, FRC IU RAS, 2017, pp. 332-340.
3. Lomov P.A. Application of ontological design patterns for creation and use of ontologies within the integrated knowledge space [Primenenie patternov ontologicheskogo proektirovaniia dlia sozdaniia i ispol'zovaniia ontologii` v ramkakh integrirovannogo prostranstva znaniia`]. Ontologiya proyektirovaniya [Ontology of design], 2015, vol. 5, no. 2(16), pp. 233-245.
4. Drozhdin V.V., Zhukov M.V. Expert-oriented approach to the development of application software [E`kspertno-orientirovannyi` podhod k razrabotke prikladnogo programmnoho obespecheniia]. Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike: Sb. statey IX Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf [Problems of informatics in education, management, economics and technology: Collection of articles of the IX International scientific and technical conf.], Penza, PDZ, 2009, pp. 131-135.
5. Alobaid A., Garijo D., Poveda-Villalón M., et al. Automating ontology engineering support activities with OnToology. Journal of Web semantics, 2019, no. 57, pp. 100472, DOI:10.1016/j.websem.2018.09.003.
6. Isotani S., Bittencourt I.I., Barbosa E.F., et al. Ontology driven software engineering: a review of challenges and opportunities. IEEE Latin America transactions, 2015, no. 13(3), pp. 863-869, DOI: 10.1109/TLA.2015.7069116.
7. Khoroshevsky VF. Ontology Driven Software Engineering: Models, Methods, Implementations [Proektirovanie sistem programmnoho obespecheniia pod upravleniem ontologii`: modeli, metody`, realizatsii]. Ontologiya proyektirovaniya [Ontology of design], 2019, no. 9(4), pp. 429-448.
8. Zagorulko Y.A., Zagorulko G.B. Experience of using content patterns in the development of Ontologies of scientific subject areas. Pattern recognition and image analysis, 2023, vol. 33, iss. 3, pp. 560-567, DOI:10.1134/S1054661823030513.
9. Zagorulko Y.A., Zagorulko G.B., Sery A.S. et al. A software package for the development of intelligent decision support systems in poorly formalized areas [Programmny`i` kompleks dlia razrabotki intellektual`ny`kh sistem podderzhki priniatiia reshenii` v slaboformalizovanny`kh oblastiakh]. Nauka i tekhnologii Sibiri. Sibirskaya industriya informatsionnykh sistem [Science and technology of Siberia, Siberian information systems industry], 2023, no.10, pp. 34-38.
10. Sapetina A., Kulikov I., Zagorulko G., et al. Constructing an expert system for solving astrophysical problems based on the ontological approach. Parallel computational technologies, communications in computer and information science, Springer, 2022. vol. 1618, pp. 30-42, DOI:10.1007/978-3-031-11623-0_3.
11. Zagorulko Y., Borovikova O., Zagorulko G. Knowledge portal on computational linguistics: content-based multilingual access to linguistic information resources. Selected topics in Applied computer science. Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Applied Computer Science (ACS'10). Hamido Fujita, Jun Sasaki (Eds.), WSEAS Press, 2010, pp. 255-262.
12. Sery A.S., Grinevich A.A., Lisin V.A. An approach to building an information research environment for analyzing scientific materials and creating annotated corpora [Podhod k postroeniiu informatsionnoi` issledovatel'skoi` sredy` dlia analiza nauchny`kh materialov i sozdaniia annotirovanny`kh korpusov]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 4 (24), pp. 68-76.
13. CIDOC Conceptual reference model, available at: <http://www.cidoc-crm.org/> (accessed: 12/01/2021).
14. Lisin V.A., Sidorova E.A. Web platform for folklore research based on the ontology of subject areas [Veb-platforma dlia fol'clorny`kh issledovaniia` na osnove ontologii predmetny`kh oblastei]. Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii [Bulletin of the Novosibirsk state university. Series: information technologies], 2021, vol. 19, no. 2, pp. 53-64.
15. Lisin V.A., Sery A.S., Sidorova E.A. Model for representing the ontology of subject areas based on graph databases [Model` predstavleniia ontologii predmetny`kh oblastei` na osnove grafovy`kh baz danny`kh]. Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii [Bulletin of the Novosibirsk

- state university. Series: information technologies], 2022, vol. 20, no. 4, pp. 24-38, DOI: 10.25205/1818-7900-2022-20-4-24-38.
16. Jesús Barrasa RDF Triple stores vs. Labeled property graphs: what's the difference? available at: <https://neo4j.com/blog/rdf-triple-store-vs-labeled-propertygraph-difference> (accessed: 01/13/2023).
17. Grinevich A., Sery A. Analysis of cultural universals of folklore of the peoples of Siberia and the Far East [Analiz kul'turny'kh universalii' fol'clora narodov Sibiri i Dal'nego Vostoka]. Materialy XXIII Mezhdunarodnoy konferentsii po analitike i upravleniyu dannymi v informatsionno yemkikh oblastiakh (DAMDID/RCDL 2021) [Proceedings of the XXIII International Conference on Analytics and Data Management in Information-Intensive Areas (DAMDID/RCDL 2021)], Moscow, 2021, no. 3036, pp. 387-401.
18. Zagorulko Yu.A. Semantic technology for developing intelligent systems aimed at subject area experts [Semanticheskaya tekhnologiya razrabotki intellektual'ny'kh sistem, orientirovannaya na e'kspertov predmetnoi oblasti]. Ontologiya proyektirovaniya [Ontology of design], 2015, no. 5(1), pp. 30-46.
19. Gribova V.V., Parshkova S.V., Fedorishchev L.A. Ontologies for developing and generating adaptive user interfaces of knowledge base editors [Ontologii dlia razrabotki i generatsii adaptivny'kh pol'zovatel'skikh interfei'sov redaktorov baz znaniy]. Ontologiya proyektirovaniya [Ontology of design], 2022, no. 12(2), pp. 200-217.
20. CIDOC-CRM ISO page, available at: <https://www.iso.org/standard/57832.html> (accessed: 12/01/2021).
21. VK ID, available at: <https://id.vk.com/about/business> (accessed: 07/01/2024).

Lisin Vladislav Aleksandrovich. PhD student at Novosibirsk State University, programmer of the second category at Institute of Informatics Systems SB RAS, (Novosibirsk, Russia). AuthorID: 1170641. SPIN: 3572-8093.

Sidorova Elena Anatolievna. PhD, Senior researcher of the Laboratory of Artificial Intelligence at the A.P. Ershov Institute of informatics systems SB RAS, associate professor at Novosibirsk state university. The research areas are related to Computational Linguistics, Intelligent System Development, Knowledge and Ontology Engineering. AuthorID: 146000, SPIN: 3674-4380, ORCID: 0000-0001-8731-3058, lsidorova@iis.nsk.su, 630090, Russia, Novosibirsk, Academician Lavrentiev Avenue, 6.

Статья поступила в редакцию 17.12.2024; одобрена после рецензирования 20.03.2025; принята к публикации 11.04.2025.

The article was submitted 12/17/2024; approved after reviewing 03/20/2025; accepted for publication 04/11/2025.

УДК 004.4.23

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.016

Рекомендательная система для выбора сервисов на геопортале ИДСТУ СО РАН

Климонов Михаил Сергеевич, Федоров Роман Константинович

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН,
Россия, Иркутск, mihail.klimonov@gmail.com

Аннотация. В статье представлена рекомендательная система для выбора сервисов на геопортале Института динамики систем и теории управления СО РАН (ИДСТУ СО РАН). Целью системы является повышение удобства поиска и использования научных веб-сервисов. Анализируются существующие подходы к организации поиска сервисов, включая онтологические модели и реестры, выявляются их ограничения и предлагается решение, устраняющее их недостатки, основанное на анализе пользовательского опыта. Результаты показывают, что разработанная система предоставляет возможность поиска и выбора наиболее релевантных сервисов для научных сотрудников на основе их предпочтений и помогает в распространении пользовательского опыта.

Ключевые слова: коллаборативная фильтрация, рекомендательная система, сервисы обработки данных, метод ближайших соседей

Цитирование: Климонов М.С. Рекомендательная система для выбора сервисов на геопортале ИДСТУ СО РАН / М.С. Климонов, Р.К. Федоров // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2 (38). – С. 199-207. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.016.

Введение. Веб-сервис – это изолированная программная система, отвечающая за выполнение определенной функциональности (предоставление услуги), которая обладает уникальным веб-адресом, стандартизованным интерфейсом и может быть вызвана через Интернет. Таким образом, веб-сервис является многократно используемой программой без необходимости установки и настройки, что значительно ускоряет его применение. При этом он может вызывать в своей работе другие веб-сервисы, интегрируя их работу и упрощая их использование в виде одного веб-сервиса. В области обработки пространственных данных (далее – ПД), определены и активно используются стандарты Open Geospatial Consortium (OGC), которые унифицируют применение сервисов. На основе существующих стандартов в рамках геопортала ИДСТУ СО РАН [1] разработаны множество сервисов получения, обработки и представления ПД, связанных с разными предметными областями. В качестве примера можно привести сервисы, реализующие предоставление и анализ данных дистанционного зондирования Земли, миграции животных, моделирование и прогнозирование экологической обстановки, оценку риска лесных пожаров и т.д. Разработанные сервисы значительно упрощают решение многих задач.

Основными пользователями геопортала являются учёные, которые применяют как отдельные сервисы, так и их последовательности. Однако при их использовании была выявлена проблема, связанная со сложностью поиска нужного сервиса. Большое количество сервисов разной тематической направленности требует организации поиска с учетом предметных областей и предпочтений пользователей. Из-за сложности поиска научные сотрудники часто не осведомлены, какие сервисы, которые могли бы помочь в их работе, разрабатываются в соседней лаборатории, институте, городе. [2]. С ростом количества сервисов данная проблема усугубляется, поэтому ее решение является актуальным.

1. Аналитический обзор. Для поиска веб-сервисов разрабатываются глобальные реестры, которые хранят их метаданные: ключевые слова, описание, входные, выходные параметры и т.д. Популярным примером такого реестра является UDDI (Universal Description Discovery and Integration) [3], который представляет метаданные в виде XML. При использовании UDDI-реестров сервисов пользователь должен самостоятельно осуществлять

поиск требуемого сервиса в списке зарегистрированных на основе метаданных и ключевых слов.

Для описания веб-сервисов используются онтологии. Они позволяют описывать предметные области с помощью понятий, атрибутов, экземпляров и отношений. Популярными стандартами для создания веб-онтологий являются Web Ontology Language for Services (OWL-S) и Web Service Modeling Ontology (WSMO). С помощью онтологий можно добиться унификации атрибутов, избежать дублирования экземпляров и построить графы связности для сервисов. Для описания сервисов с помощью онтологии разработчикам и модераторам зачастую требуется глубокое понимание не только предметной области сервиса и его реализации, но и понимание всей существующей системы атрибутов и понятий [4].

Универсальное обнаружение описаний (UDD), интеграция (UDDI) и язык веб-онтологий для сервисов (OWL-S) – это методы, которые могут быть использованы для организации и обнаружения веб-сервисов. Они играют важную роль в описании структуры и стандартизации сервисов, формализации выполняемой обработки или анализа. Эти протоколы помогают в документировании атрибутов сервиса и индексировании для быстрого поиска при использовании основных ключевых слов для поисковой службы [5].

Отметим, что системы поиска, основанные на реестрах и онтологиях, не дают удовлетворительных результатов из-за недостаточности метаинформации о сервисах (так как пользователи недостаточно погружаются в онтологическую систему, модераторам также сложно вникать в конкретную реализацию сервисов для их описания, что увеличивает вероятность ошибки и время для внедрения сервиса в систему). Эти системы не учитывают персональных предпочтений пользователя (круг решаемых им задач). Из-за отсутствия информации о существующих сервисах, пользователи не могут сформировать точный поисковый запрос.

Для решения вышеописанной проблемы может быть использована рекомендательная система для подбора и ранжирования сервисов, с учётом опыта пользователя, области его исследования и запроса (запрос может отсутствовать). Выделяют шесть видов рекомендательных систем:

- рекомендация на основе правил;
- рекомендация на основе статистики;
- контентная фильтрация;
- коллаборативная фильтрация;
- экспертная фильтрация, основанная на знаниях;
- гибридные рекомендательные системы [6].

Системы на основе правил. Эти системы используют заранее определённые правила для формирования рекомендаций. Например, они могут предлагать пользователям товары со скидкой или новинки.

Системы на основе статистики. Такие системы позволяют советовать популярные сервисы в целом или по отдельным критериям.

Контентная фильтрация. Этот подход основывается на характеристиках и описаниях элементов для предложения пользователю схожих объектов, которые могут представлять для него интерес. Основными преимуществами контентной фильтрации являются: возможность предлагать новые элементы, доступность для новичков и отсутствие проблемы холодного старта, когда у пользователя нет истории оценок. Однако этот метод имеет ограничения, так как может упускать скрытые предпочтения пользователя, связанные с его поведением, которые не отображены в самом содержании элемента [7].

Коллаборативная фильтрация. В этом методе анализируется взаимодействие пользователей и объектов для создания рекомендаций. Плюсы коллаборативной фильтрации заключаются в способности выявлять скрытые шаблоны и предпочтения, что позволяет предоставлять более индивидуализированные рекомендации. Однако к недостаткам можно отнести ограниченные возможности в предложении новых элементов и требование наличия значительного объема данных о пользователях и их предпочтениях для получения точных предсказаний [8].

Фильтрация на основе знаний. Этот метод использует экспертные знания или заранее заданные правила для формирования рекомендаций. К его преимуществам относятся возможность обоснования предложений и учет определенных условий и правил. Однако данный подход нуждается в постоянном обновлении базы знаний и может ограничивать разнообразие предложений [9].

Гибридная рекомендательная система. Данный тип системы сочетает в себе различные методы рекомендаций, такие, как, например, контентная, коллаборативная фильтрации на основе знаний (и другие с целью повышения точности и полезности рекомендаций) [6].

В результате проведенного анализа для решения поставленной проблемы предлагается реализовать рекомендательную систему для выбора веб-сервисов, в основе которой будет лежать алгоритм коллаборативной фильтрации для учета пользовательского опыта и создания персонализированных рекомендаций.

2. Постановка задачи. Обозначим множество пользователей $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ и множество сервисов $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$. Рекомендательная система для выбора веб-сервисов должна ранжировать сервисы с учетом пользовательских предпочтений. Таким образом, решение проблемы формулируется, как построение функции оценки релевантности сервисов для пользователя:

$$r(u_i, s_j) \rightarrow [0, 1], \quad (1)$$

где $u_i \in U$, $s_j \in S$, значение функции, равное 0, обозначает, что сервис не соответствует нуждам пользователя, а 1 – наоборот. Чем больше значение функции, тем большей релевантностью обладает сервис для выбранного пользователя.

В рамках геопортала производится сбор статистики применения сервисов. Таким образом, информация о поведении пользователя в информационной системе выражается количеством вызовов c_{ij} сервиса s_j пользователем u_i .

Важно учитывать, что иногда сервисы ориентированы на определенные предметные области или же могут быть универсальными и использоваться в разных предметных областях. Предполагается, что при использовании специалистом нового сервиса его можно рекомендовать другим специалистам из этой же области или коллегам из других областей, но работающим над похожими задачами или имеющим общие области интереса. Возникает подзадача определения близости пользователей.

$$d(u_i, u_g) \rightarrow [0, \infty), \quad (2)$$

где d – функция, определяющая расстояние между пользователями (близость). Значение функции, равное 0, характеризует полное совпадение области интересов, тогда как увеличение значения указывает на их расхождение. Близость пользователей можно оценить на основе статистики их взаимодействия с сервисами. Совпадение множества используемых сервисов с учетом частоты вызовов свидетельствует о схожести исследовательских интересов. Определение группы пользователей с близкими научными интересами относительно пользователя u_i выполняется при помощи анализа статистики c_{ij} .

Вычисление функции r будет производиться на основе множества ближайших соседей, сформированного для каждого пользователя u_i . Далее будем обозначать данное множество $U_i^{neighbours} \subseteq U$.

3. Решение поставленной задачи. Предлагается решение задачи с помощью метода, включающего следующие этапы:

- сбор данных;
- определения близости пользователей;
- ранжирование сервисов (вычисление оценок сервисов).

3.1. Сбор данных. В рамках геопортала реализован сбор данных о применении пользователями веб-сервисов, регистрируется каждое взаимодействие пользователя с сервисом. Ключевыми параметрами собираемых данных являются:

- метаданные сервиса: включают тип сервиса (например, WPS, DAG), входные и выходные параметры в формате JSON и уникальные идентификаторы сервиса [10];
- взаимодействие пользователя со сервисом: каждый раз, когда пользователь обращается к сервису, регистрируются время начала и окончания выполнения сервиса; пользователь, который его вызвал; данные ввода/вывода.

Этот комплексный сбор данных позволяет отслеживать как количественные (количество обращений к сервисам), так и качественные (входные/выходные параметры) аспекты использования сервисов.

Пользователи, близкие по области интересов, могут иметь один и тот же набор примененных сервисов, но значительно отличаться по количеству их применения в зависимости от активности. Для оценки применения сервиса пользователем предлагается нормированное количество вызовов сервиса пользователем:

$$q_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sum_{k=0}^m c_{ik}}, \quad (3)$$

где q_{ij} – отношение c_{ij} , к количеству вызовов всех сервисов пользователем u_i

Данные, собранные в результате взаимодействия с сервисами, преобразуются в матрицу «пользователь-сервис», представленную в таблице 1, где строки – это пользователи u_i , столбцы – это сервисы s_j , на пересечении строк и столбцов отображено отношение количества вызовов данного сервиса соответствующим пользователем к общему числу вызовов пользователя. Стоит отметить, что данная матрица является разреженной (имеет нулевые ячейки) вследствие того, что пользователи взаимодействуют только с небольшим набором сервисов.

Таблица 1. Матрица значений q_{ij}

	s_1	...	s_m
u_1	0.2	...	0.25
...	...	...	...
u_n	0	...	0.2

Таким образом, наибольшее число в строке указывает на самый популярный сервис для пользователя. Каждая строка таблицы 1 представляет собой вектор $q_i = \{q_{i1}, \dots, q_{im}\}$, описывающий пользователя u_i .

3.2. Определение близости пользователей. Для определения близости между пользователями на основе векторов q_i и q_g могут использоваться различные метрики. Наиболее популярные [11] – это евклидово расстояние, манхэттенское расстояние и косинусное расстояние. Заметим, что первые две метрики в большей степени учитывают количество вызовов каждого сервиса пользователем, а метрика косинусного расстояния в большей степени учитывает, какие сервисы использовал пользователь. Предполагается, что

косинусное расстояние позволит лучше определить пользователей со схожими областями интересов. Поэтому для определения близости пользователей будет использоваться следующая формула:

$$d(u_i, u_g) = \frac{\vec{u_i} \vec{u_g}}{|\vec{u_i}| |\vec{u_g}|}. \quad (4)$$

Эта метрика определяет угол между пользователями (векторами) u_i и u_j в пространстве с m признаками.

3.3. Ранжирование веб-сервисов. Одной из тривиальных стратегий рекомендации является отображение наиболее часто используемых пользователем сервисов. Для ее реализации достаточно отсортировать сервисы по значениям q_i . При этом сервисы, которые специалист никогда не использовал, будут иметь нулевые значения. Для таких сервисов предлагается стратегия, основанная на статистике применения сервисов, близких по области интересов пользователей. Для каждого пользователя u_i формируется множество $U_i^{neighbours}$, которое состоит из пользователей с наименьшими значениями функции близости, при этом $|U_i^{neighbours}| = l - 1$. Далее будем называть таких пользователей ближайшими соседями. На данный момент в рекомендательной системе используется $l = 3$, данное значение было выбрано с помощью метода перебора гиперпараметров. Далее будут проведены дополнительные исследования.

Таким образом, функция оценки может быть представлена в следующем виде:

$$r(u_i, s_j) = \sum_{k \in U_i^{neighbours}} \frac{q_{kj}}{|U_i^{neighbours}|} \quad (5)$$

Для получения оценки сервисов после определения ближайших соседей по каждому сервису подсчитывается среднее значение векторов q_i для пользователей $u_i \in U_i^{neighbours}$. В результате получаем вектор оценок r_i , где каждый компонент r_{ij} является оценкой s_j сервиса для пользователя u_i .

4. Апробация предложенного алгоритма. Описанный выше алгоритм был реализован в виде микросервиса для предоставления рекомендаций пользователям геопортала ИДСТУ СО РАН.

Для проверки адекватности функции близости пользователей проведен анализ данных пользователей геопортала и результатов вычислений функции. Области интересов пользователей заданы на основе принадлежности к областям научных направлений их институтов. После сбора статистики применения сервисов предрасположенность пользователей проанализирована с использованием инструментов для визуализации. Так, для оценки близости пользователей и их кластеризации был построен график (рис. 1) с помощью метода главных компонент (РСА) по данным, полученным из векторов, приведенных в таблице 1, на котором можно заметить, как пользователи группируются даже на 3 сервисах.

С помощью функции (формула 4) была вычислена метрика близости между всеми парами пользователей. Для каждого пользователя определено множество ближайших его соседей $U_i^{neighbours}$. На рисунке 2 показан граф, в котором пользователи заданы с помощью вершин, а дуги обозначают, что пользователи являются ближайшими соседями. Вершины графа отображаются разными цветами: зеленые – ботаники, красные – математики, синие – географы, серые – системные пользователи, которые разрабатывают и помогают с внедрением новых сервисов.

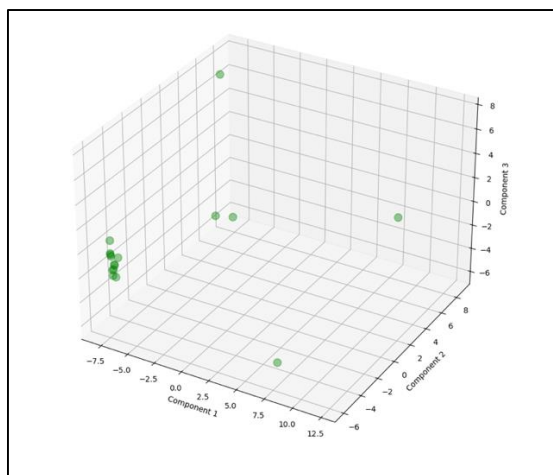


Рис. 1. 3D-визуализация близости пользователей с помощью PCA

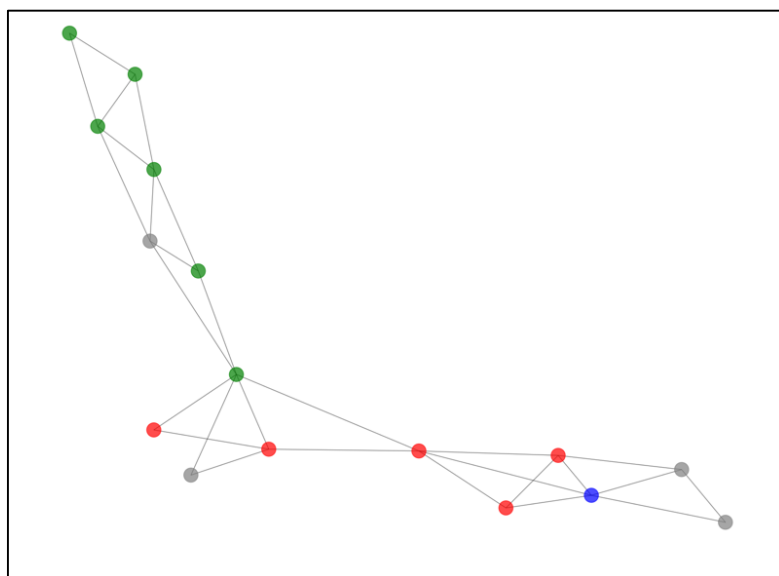


Рис. 2. Связи между пользователями после поиска ближайших соседей

Можно заметить, что пользователи кластеризуются по предметным областям, некоторые из них работают над смежными задачами, проводят совместные исследования – это подтверждает анализ статистики по использованию сервисов. Системные пользователи участвуют в разработке сервисов для специалистов, как из одной области, так и из нескольких.

На рисунке 3 представлены множество ближайших соседей $U_2^{neighbours}$ для пользователя u_2 , окружности представляют пользователей, а квадратные элементы – сервисы. Непрерывная стрелочка обозначает, что пользователь ранее взаимодействовал с сервисом, прерывистая обозначает, что сервис попадет в рекомендательную выборку пользователя.

Благодаря разработанной рекомендательной системе пользователю будут предлагаться те сервисы, которые уже использовали ближайшие соседи. В частности, пользователю u_2 будет рекомендован ранее им не использованный сервис s_1 , так как он был применен пользователем u_1 из множества $U_2^{neighbours}$. Сервис s_2 не будет добавлен в рекомендательную выборку, так как его не использовали специалисты из множества ближайших соседей и сам пользователь, т.е. его функция оценки $r(u_2, s_2) = 0$.

Применение нового сервиса пользователем приводит к тому, что сервис попадает в рекомендации его ближайшим соседям (близким по предметным областям). Таким образом, людям, работающим в одной предметной области, можно рекомендовать сервисы, популярные среди коллег.

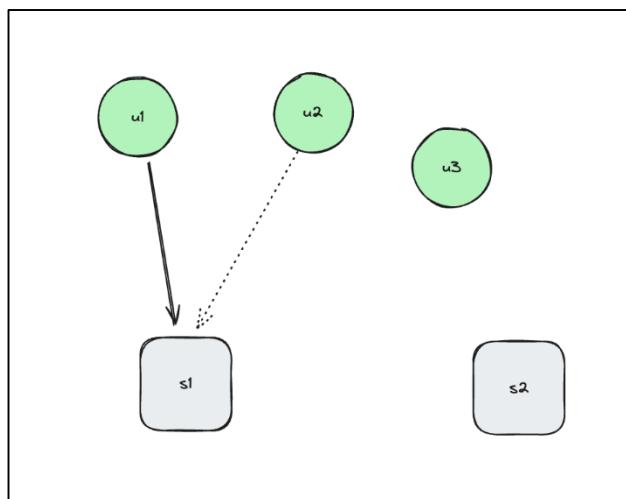


Рис. 3. Схема рекомендации нового сервиса для множества ближайших соседей

После расчета оценок по формуле 5 полученные результаты можно также представить в виде графа связности (рисунок 4) пользователей и сервисов. Для улучшения восприятия графика показываются по 3 сервиса с наилучшими оценками. На графике видно, что пользователи кластеризуются по предметным областям на основе информации применения сервисов, например, ботаники чаще взаимодействуют с сервисом 1000100, а математики с сервисом 309.

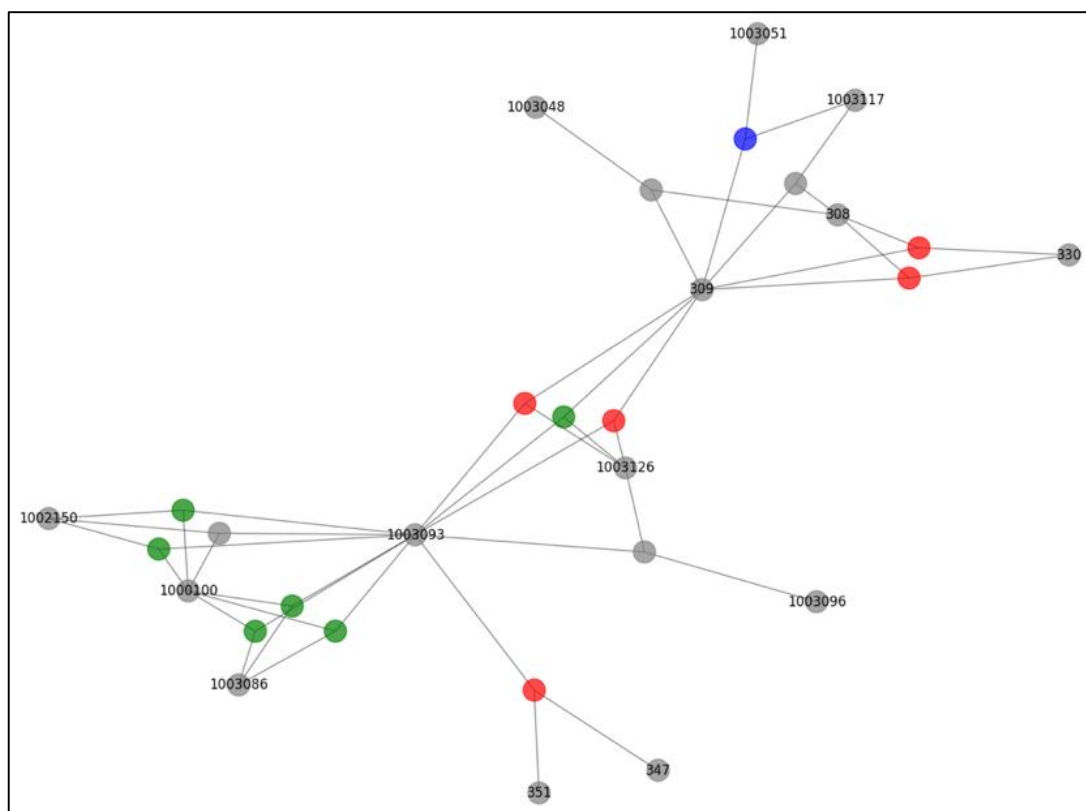


Рис. 4. Связи между пользователями и популярными сервисами

Заключение. В рекомендательной системе геопортала реализованы три стратегии рекомендации сервисов:

1. Предоставление пользователю списка наиболее часто используемых им сервисов. Это позволяет упростить решение повседневных задач.
2. Рекомендация наиболее популярных сервисов среди всех пользователей.
3. Рекомендации новых, ранее не используемых пользователем, сервисов на основе предложенного в статье метода.

Разработанная рекомендательная система решает проблему поиска сервисов и распространения информации об их использовании среди специалистов одной предметной области и способна рекомендовать сервисы, которые пользуются популярностью, с учетом области интересов.

В настоящее время эта система является первой рекомендательной системой для веб-сервисов стандарта OGC; внедрена на геопортале ИДСТУ СО РАН; проводится сбор статистики для А/В тестирования, оценки улучшения пользовательского опыта [12].

В дальнейшем планируется комбинировать рекомендательные методы с учетом взаимной интероперабельности сервисов, которая определяется с помощью анализа информации о входных и выходных параметрах сервисов и статистики их применения.

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития: «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды».

Список источников

1. Фёдоров Р.К. Система планирования и выполнения композиций веб-сервисов в гетерогенной динамической среде / Р.К. Фёдоров, И.В. Бычков, А.С. Шумилов и др. // Вычислительные технологии, 2016. – Т. 21. – № 6. – С. 18-35
2. Климонов М.С. Классификация пользователей на основе применения сервисов. / М.С. Климонов // Ляпуновские чтения, 2024. – 2024. – С. 106
3. UDDI 101. – URL: <https://uddi.xml.org/uddi-101> (дата обращения: 08.02.2025).
4. Глазунов В.А. Пространственные механизмы параллельной структуры / В.А. Глазунов. – М.: Наука, 1991. – 94 с
5. Pedrinaci C., Domingue J., Sheth A.P. Semantic Web Services. Handbook of semantic web technologies, 2011, vol. 2, pp. 977-1035, DOI:10.1007/978-3-540-92913-0_22.
6. Ляликова В.Г. Построение гибридной рекомендательной системы / В.Г. Ляликова, М.М. Безрядин // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2021. – № 4. – С. 121-129.
7. Масюк А.А. Контентная фильтрация и управление доступом к ресурсам сети Интернет в образовательных учреждениях / А.А. Масюк, С.Э. Сараджишвили // Информатика, телекоммуникации и управление, 2010. – №. 4 (103). – С. 153-162.
8. Микуленя И.В. Коллаборативная фильтрация / И.В. Микуленя, Ю.С. Белов // В мире науки и инноваций, 2017. – С. 72.
9. Голубев Р.О. Методы и ограничения в рекомендательных системах / Р.О. Голубев // Актуальные исследования, 2024. – № 9-1 (191). – С. 34-36.
10. Фёдоров Р.К. Формирование композиций сервисов на основе статистических данных пользователей / Р.К. Фёдоров, И.В. Бычков, Г.М. Ружников // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии, 2021. – Т. 19. – №. 2. – С. 115-130.
11. Шахбанов Р. KNN-метод k-ближайших соседей. – URL: <https://shakhbanov.org/knn-metod-k-blizhayshih-sosedey/> (дата обращения: 08.02.2025).
12. Яндекс. Как проводят А/В-тесты. – URL: <https://education.yandex.ru/journal/kak-provodyat-ab-testy>, свободный (дата обращения: 08.02.2025).

Климонов Михаил Сергеевич. Аспирант Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН. Основные направления исследований: распределенные системы, микросервисы, алгоритмы машинного обучения. AuthorID: 1072990, SPIN: 5410-2442, ORCID: 0009-0008-3176-8684, mihail.klimonov@gmail.com, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134.

Федоров Роман Константинович. к.т.н., ведущий научный сотрудник ИДСТУ СО РАН. AuthorID: 118389, SPIN: 5344-2226, ORCID: 0000-0002-2944-7522, fedorov@icc.ru.com, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134.

UDC 004.4.23

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.016

Recommender system for selecting services on the ISDCT SB RAS

Mikhail S. Klimonov, Roman K. Fedorov

Institute of System Dynamics and Control Theory named after V.M. Matrosov SB RAS,
Russia, Irkutsk, mihail.klimonov@gmail.com

Abstract. This article presents the design and development of a recommender system for selecting services on the geospatial portal of the Institute of system dynamics and control theory SB RAS (ISDCT SB RAS). The system aims to assist researchers in discovering suitable web services by applying advanced data analysis techniques, in particular collaborative filtering. The current challenges in the traditional systems, including the difficulty of service discovery and lack of personalized recommendations, are addressed. A method for recommending web services is proposed, based on an analysis of a user's preferences and their nearest neighbors. The results demonstrate that the proposed system offers an opportunity to find the most relevant services for researchers based on their patterns of use and preferences.

Keywords: Collaborative filtering, recommender systems, data processing services, nearest neighbor method

Acknowledgements: The work was carried out as part of grant No. 075-15-2024-533 from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of a major scientific project in priority areas of scientific and technological development: "Fundamental research of the Baikal natural territory based on a system of interconnected basic methods, models, neural networks and a digital platform for environmental monitoring".

References

1. Fedorov R. K., Bychkov I. V., Shumilov A. S., et al. Sistema planirovaniya i vypolneniya kompozitsiy veb-servisov v geterogennoy dinamicheskoy srede [System of planning and execution of compositions of web services in a heterogeneous dynamic environment]. *Vychislitel'nyye tekhnologii* [Computational technologies], 2016, vol. 21, no. 6, pp. 18-35.
2. Klimonov M.S. Klassifikatsiya pol'zovateley na osnove primeneniya servisov [Classification of users based on service usage]. *Lyapunovskiye chteniya* [Lyapunov Readings], 2024, 106 p.
3. UDDI 101. Available at: <https://uddi.xml.org/uddi-101> (accessed: 02/08/2025).
4. Glazunov V.A. Prostranstvennyye mekhanizmy parallel'noy struktury [Spatial mechanisms of parallel structure]. M.: Nauka, 1991, 94 p.
5. Pedrinaci C., Domingue J., Sheth A.P. Semantic Web Services. Handbook of semantic web technologies, 2011, vol. 2, pp. 977-1035, DOI:10.1007/978-3-540-92913-0_22.
6. Lyalikova V.G., Bezryadin M.M. Postroyeniye gibridnoy rekomendatel'noy sistemy [Building a hybrid recommendation system]. *Vestnik VGU. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii* [Vestnik VSU. Series: System analysis and information technologies], 2021, no 4, pp. 121-129.
7. Masyuk A.A., Saradjishvili S.E. Kontentnaya fil'tratsiya i upravleniye dostupom k resursam seti Internet v obrazovatel'nykh uchrezhdeniyakh [Content filtering and access control to Internet resources in educational institutions]. *Informatika, telekommunikatsii i upravleniye* [Computer science, telecommunications and management], 2010, no. 4 (103), pp. 153-162.
8. Mikuleny I.V., Belov Yu.S. Kollaborativnaya fil'tratsiya [Collaborative filtering]. *V mire nauki i innovatsiy* [In the world of science and innovation], 2017, 72 p.
9. Golubev R.O. Metody i ogranicheniya v rekomendatel'nykh sistemakh [Methods and limitations in recommender systems]. *Metody i ogranicheniya v rekomendatel'nykh sistemakh* [Actual research], 2024, no. 9-1 (191), pp. 34-36.
10. Fedorov R.K., Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M. Formirovaniye kompozitsiy servisov na osnove statisticheskikh dannykh pol'zovateley [Formation of service compositions based on user statistics]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of Novosibirsk state university. Series: information technology], 2021, vol. 19, no. 2, pp. 115-130.
11. Shakhbanov R. KNN-metod k-blizhayshikh sosedey [KNN method of k-nearest neighbors]. Available at: <https://shakhbanov.org/knn-metod-k-blizhayshih-sosedey/> (accessed: 02/08/2025).
12. Yandex Kak provodyat A/B-testy. [How A/B tests are conducted]. Available at: <https://education.yandex.ru/journal/kak-provodyat-ab-testy> (accessed: 02/08/2025).

Klimonov Mikhail Sergeevich. Postgraduate student at the Institute of system dynamics and control theory named after V.M. Matrosov SB RAS. Main research areas: distributed systems, microservices, machine learning algorithms. AuthorID: 1072990, SPIN: 5410-2442, ORCID: 0009-0008-3176-8684, mihail.klimonov@gmail.com, 664033, Russia, Irkutsk, Lermontov str., 134.

Fedorov Roman Konstantinovich. PhD, works as a leading researcher at the Institute of system dynamics and control theory named after V.M. Matrosov SB RAS. AuthorID: 118389, SPIN: 5344-2226, ORCID: 0000-0002-2944-7522, fedorov@icc.ru.com, 664033, Russia, Irkutsk, Lermontov str., 134.

Статья поступила в редакцию 21.11.2024; одобрена после рецензирования 23.03.2025; принята к публикации 11.04.2025.

The article was submitted 11/21/2024; approved after reviewing 03/23/2025; accepted for publication 04/11/2025.

УДК 004.925.5

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.017

Исследование восприятия образовательного ВЕБ-ресурса пользователями с применением технологии айтрекинга

**Смирнова Александра Константиновна¹, Янчус Виктор Эдмундасович¹,
Титов Максим Сергеевич², Юдин Андрей Николаевич², Нургалеев Тимур Рустемович²,
Булычев Дмитрий Андреевич², Михайлов Илья Андреевич²**

¹Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург, *vic.phd.2019@gmail.com*

²МИРЭА - Российский технологический университет,
Россия, Москва

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования факторов управления вниманием пользователей и улучшения восприятия зрительной информации на высоконагруженных образовательных порталах. Дизайн информационных веб-сайтов оказывает значительное влияние на эффективность передачи информации в рамках перегруженности контентом. Результаты, полученные в ходе предварительного эксперимента, послужили основой для изменения стимульного материала с целью выявления статистических закономерностей. Эксперимент проводился при помощи технологии айтрекинга, включал в себя 16 стимулов и 6 поставленных задач. В ходе обработки полученных данных посредством дисперсионного анализа было выявлено влияние совокупности цветового решения и выделения текста фоном на скорость восприятия контента, которая, в свою очередь, была принята в качестве критерия оценки эффективности человеко-компьютерного взаимодействия и интерпретации данных. Приведенное исследование может быть основой для проведения дальнейших экспериментов и разработки рекомендаций по проектированию эффективных информационных веб-ресурсов.

Ключевые слова: Технология айтрекинга, эксперимент, стимульный материал, восприятие зрительной информации, информационный веб-ресурс, математическая статистика

Цитирование: Смирнова А.К. Исследование восприятия образовательного ВЕБ-ресурса пользователями с применением технологии айтрекинга / А.К. Смирнова, В.Э. Янчус, М.С. Титов, А.Н. Юдин, Т.Р. Нургалеев, Д.А. Булычев, И.А. Михайлов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2 (38). – С. 208-217. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.017.

Введение. При проектировании эффективных информационных веб-ресурсов особую роль играет понимание процессов обработки зрительной информации и, как следствие, факторов, влияющих на удобство пользования интерфейсом [1].

В ходе исследования изучаются особенности восприятия контента на информационном сайте, который содержит полезную информацию для пользователей в определенной сфере интересов [2]. В данном случае речь идет об исследовании восприятия образовательного цифрового ресурса по физике для студентов.

На информационно перегруженных сайтах отмечаются затрудненные поиск информации и обработка считываемых пользователем данных [3]. Подход к представлению контента в цифровом пространстве требует учета особенностей восприятия информации пользователями [4] и умения управлять материальностью текста [5]. Под восприятием понимается комплексная деятельность от момента получения зрительной информации и до ее осмысления в результате интерпретации [6, 7]. При этом «исполнительный орган» восприятия и процесс формирования перцептивного образа остаются неизвестными [8].

Одним из методов анализа юзабилити интерфейса и оценки эффективности человеко-компьютерного взаимодействия является технология отслеживания глаз [9-11]. Система айтрекинга позволяет фиксировать окуломоторную активность. Процесс зрительного восприятия происходит за счет совокупности фиксаций и саккад. Фиксации представляют собой периоды, когда взгляд сфокусирован на определенной области, а саккады – это быстрые перемещения взгляда между областями. Предполагается, что прием зрительной информации

происходит во время фиксации [12]. Регистрация движения зрачков пользователей осуществляется за счет того, что прибор излучает инфракрасный свет, который, попадая на глаз, отражается от роговицы и зрачка. Роговица воспринимается, как светлое пятно, а зрачок распознается, как темное. Отраженный свет попадает на камеру айтрекера. Линзы камеры фокусируют отраженный свет, формируя изображение глаза. За счет математических алгоритмов определяется положение глаза и взгляд пользователя на мониторе компьютера [13].

Результаты экспериментов, проведенных на базе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [14, 15], выдвигают новые методики в области веб-проектирования. На основе экспериментов, проведенных с применением технологии айтрекинга, предложена информационная модель восприятия информации [16].

Целью данного исследования является определение особенностей восприятия данных пользователями на веб-ресурсах с их последующей интерпретацией в информацию на основе применения технологии айтрекинга. Эксперимент проводится в специализированном программно-аппаратном комплексе айтрекинга SMI Red 250.

Шаблон рассматривания веб-сайта зависит от решаемой пользователем задачи [17] (шаблон рассматривания – набор параметрических данных, снимаемых в ходе эксперимента с айтрекингowej установки). Критерием для оценки эффективности взаимодействия пользователя с веб-ресурсом является время считывания контента [18].

1. Постановка эксперимента. В исследовании рассматриваются влияние цветового решения, композиционного решения и выделения блоков контента на восприятие зрительной информации пользователями на образовательном веб-ресурсе по физике (рис. 1).

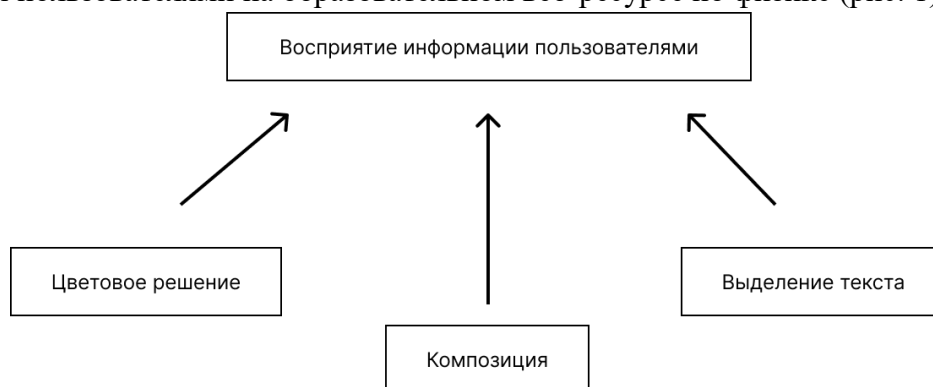


Рис. 1. Схема эксперимента по исследованию восприятия зрительной информации на веб-ресурсе

Испытуемым предлагается рассмотрение стимульного материала в цветовых сочетаниях, соответствующих двум цветным каналам (красно-зеленое и желто-синее цветовые решения) и одному черно-белому каналу (бело-черное и черно-белое цветовые решения). Данный выбор обусловлен бинарной моделью Юрьева [19] и направлен на изучение механизмов восприятия цвета с целью выявления принципов эффективной организации зрительной информации в цифровой среде. Вторым рассматриваемым фактором является композиционное отображение информации списком или сеткой с сохранением плотности представления контента. Выбранные виды визуального ритма представляют собой паттерны организации информации на веб-ресурсе в случае решения задачи поиска конкретного элемента пользователем [20]. Помимо этого, методика эксперимента включает в себя исследование влияния фактора выделения текста фоном.

Ранее был проведен предварительный эксперимент [21], в ходе которого не удалось выявить некоторые закономерности восприятия контента, что, в первую очередь, связано с

особенностями разработки стимульного материала. Изменение стимулов, в частности, сокращение и структуризация информации для упрощения решения пользователями поставленных задач, позволило выявить статистические закономерности восприятия зрительной информации. Всего респондентам были предложены 16 стимулов, в которых менялись рассматриваемые факторы, а текстовая информация перемешивалась во избежание контекстуального ожидания [22]. Семантическая сложность текста снижена [23], чтобы респонденты независимо от направления образования могли справиться с поставленной задачей. Разработанный стимульный материал приведен на рисунке 2.

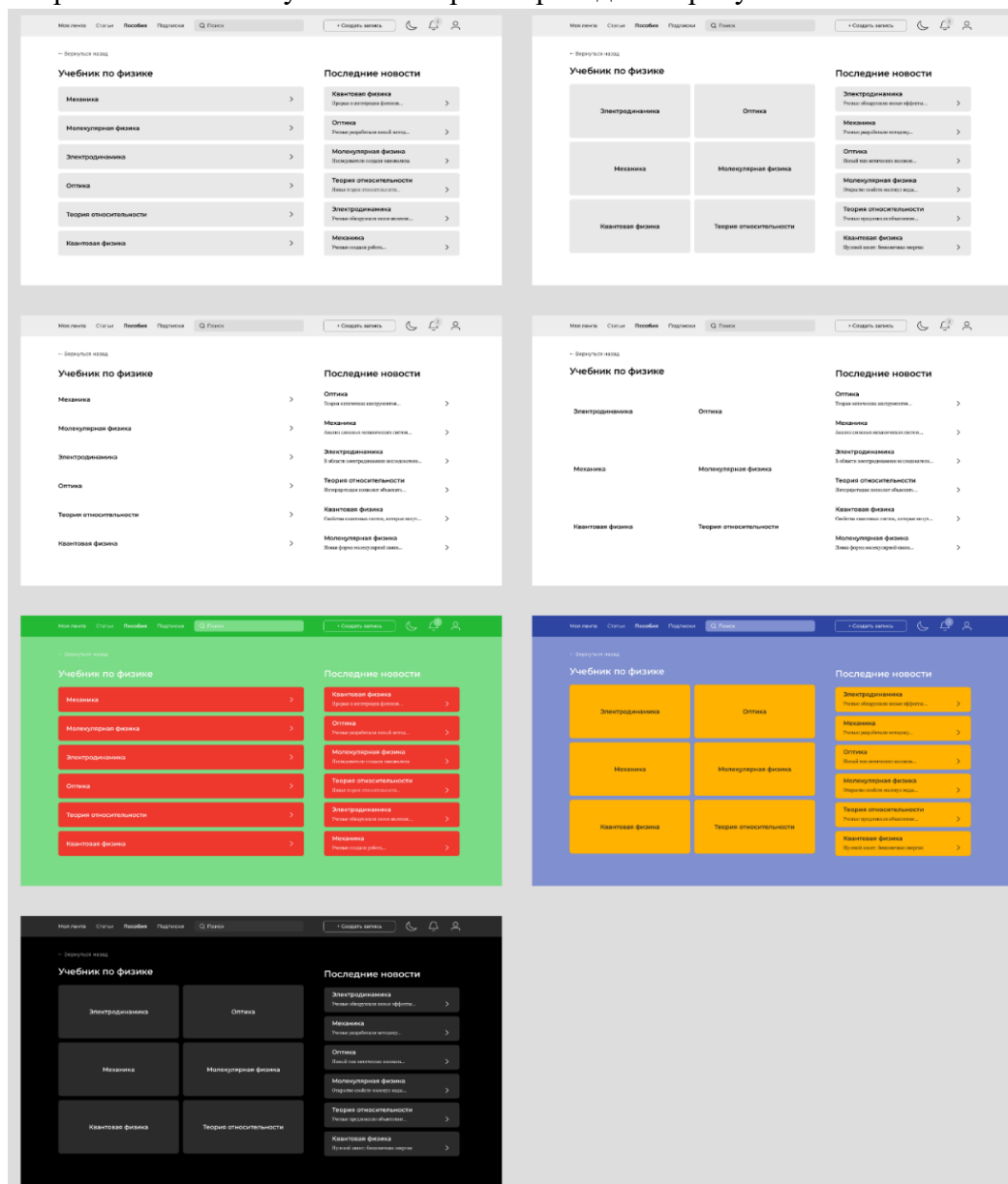


Рис. 2. Стимульный материал

Перед испытуемыми была поставлена задача: необходимо найти главу из учебника по физике, которая указана на экране, и соответствующую ей новость, и нажать на нее мышкой (рис. 3).

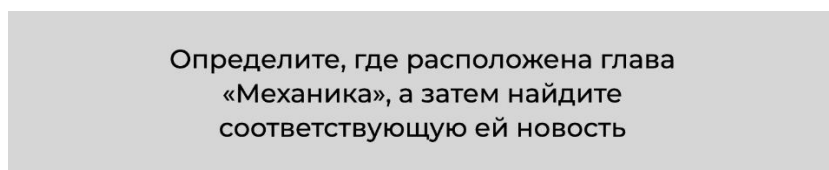


Рис. 3. Пример постановки задачи для испытуемых

2. Анализ полученных данных. В приведенном исследовании приняли участие 30 испытуемых в возрасте от 18 до 23 лет, которые являются студентами Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Все испытуемые были отобраны среди студентов как технических, так и гуманитарных институтов. Количество участников эксперимента является достаточным для получения достоверных данных [13]. Было собрано фиксаций – 5790 и саккад – 5515.

В результате статистической обработки результатов эксперимента посредством дисперсионного анализа [24] были выявлены некоторые закономерности. Уровень значимости $p\text{-value}=0,05$ принят как достаточный для выдвижения гипотезы. Результаты вычисления значений $p\text{-value}$ и функции Фишера F при проведении дисперсионного анализа экспериментальных данных с помощью процедуры ANOVA приведены в таблице 1.

Таблица 1. Вычисленные значения $p\text{-value}$ и функции Фишера F

Фактор	$p\text{-value}$	F
Для параметра «Количество фиксаций»		
Композиция	0,214	1,547
Цвет	0,058	2,506
Фоновое выделение	0,009	6,832
Цвет*фоновое выделение	$\leq 0,001$	11,989
Для параметра «Количество саккад»		
Композиция	0,353	0,863
Цвет	0,051	2,615
Фоновое выделение	0,010	6,698
Цвет*фоновое выделение	$\leq 0,001$	12,470
Для параметра «Общая длительность рассматривания»		
Композиция	0,481	0,498
Цвет	0,340	1,120
Фоновое выделение	0,025	5,057
Цвет*фоновое выделение	$\leq 0,001$	5,736

Представленные значения $p\text{-value}$ свидетельствуют о статистической зависимости параметров шаблона рассматривания стимульного материала от фактора «фоновое выделение» и совокупного влияния факторов «цветового решения» и «фоновое выделение» (табл. 1). Примечательно, что фактор цветового решения оказывает влияние на восприятие информации только при наличии фона.

На рисунке 4 приведена зависимость общей длительности времени рассматривания стимульного материала в зависимости от выбранных факторов: цвета, композиции, выделения контента. Из представленного графика следует, что наличие или отсутствие фонового выделения контента оказывает влияние на скорость восприятия стимулов испытуемыми при определенных цветовых решениях. В случае расположения контента списком при черно-белом варианте наличие фонового выделения улучшает восприятие информации, как следствие, поставленная задача в среднем решается быстрее на 700 мс. При композиционном решении в виде сетки наличие фонового выделения оказывает влияние на скорость восприятия при черно-белом, красно-зеленом и желто-синем цветовых решениях. Следует отметить, что при желто-синем цветовом решении наличие фонового выделения ухудшает восприятие контента.

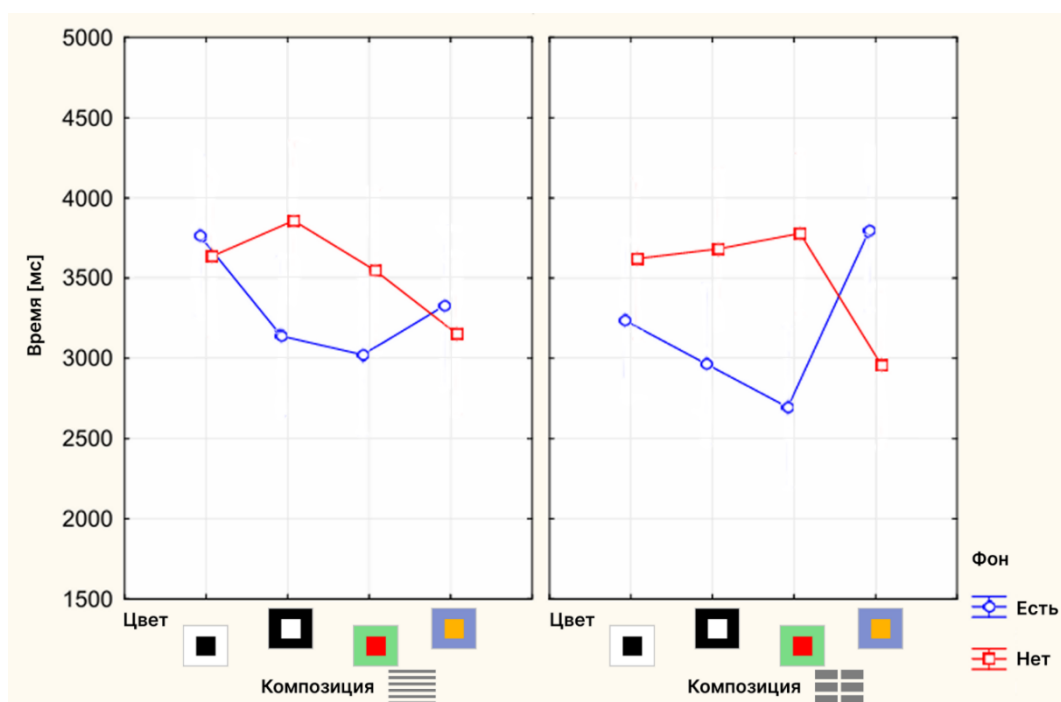


Рис. 4. График распределения значений общей длительности времени рассматривания стимула в зависимости от цвета, композиции и выделения текста

На рисунке 5 путь взора, который может свидетельствовать о когнитивной нагрузке при взаимодействии пользователя с интерфейсом, подтверждает наличие зависимости фактора фона от цветового решения. При представлении контента списком нельзя четко сказать о возможной зависимости скорости решения задачи пользователем от фонового выделения при рассмотренных цветовых решениях. При отображении информации в виде сетки зависимость выделения фоном контента наблюдается при черно-белом, красно-зеленом и желто-синем цветовых решениях. Последняя цветовая пара (желто-синяя) указывает на меньший путь взора при отсутствии фонового выделения.

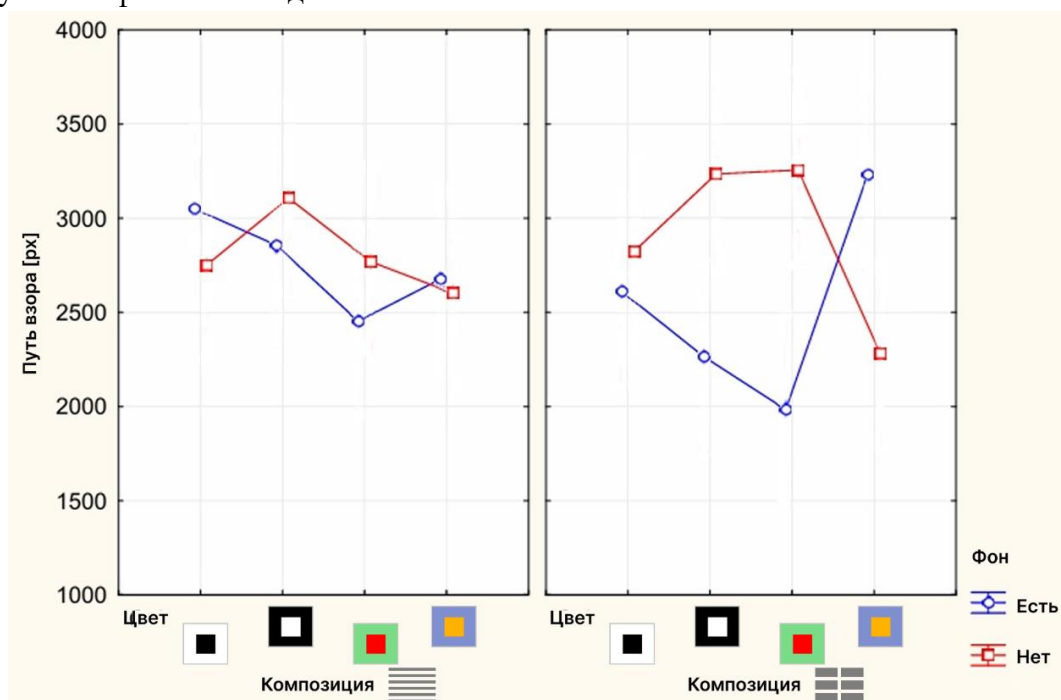


Рис. 5. График распределения значений пути взора в зависимости от цвета, композиции и выделения текста

Рисунок 6 свидетельствует о том, что при наличии фонового выделения контента, независимо от композиционного решения, черно-белому и красно-зеленому цветовым решениям соответствует меньшее количество саккад. При сине-желтом цветовом решении количество саккад в случае применения композиции «сетка» меньше, когда фоновое выделение контента отсутствует.

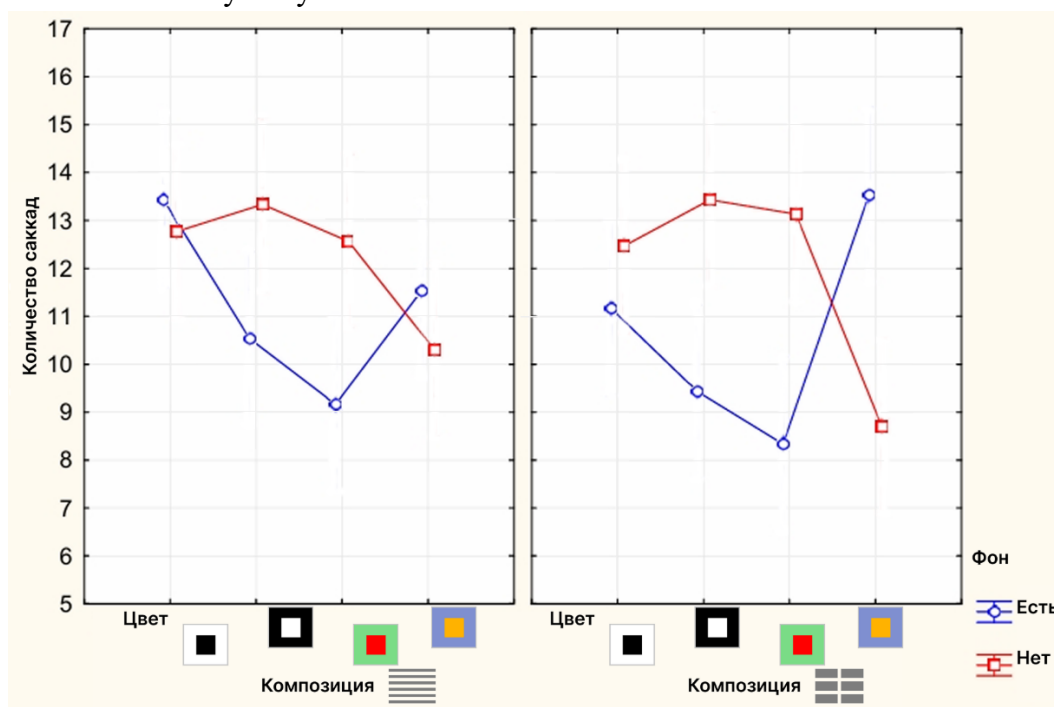


Рис. 6. График распределения значений количества саккад в зависимости от цвета, композиции и выделения текста

При проведении количественного анализа результатов эксперимента был выявлен ряд закономерностей. Рассмотрены следующие параметры движения глаз: длительность рассматривания стимула, путь взора, количество саккад. Время взаимодействия со стимульным материалом позволяет оценить скорость решения поставленной задачи. Путь взора показывает, как пользователь взаимодействует с интерфейсом, изучает представленную информацию. Количество саккад отображает процесс сравнения информации испытуемыми при решении задачи.

Выводы. В ходе эксперимента были сделаны следующие выводы:

1. Фактор выделения оказывает наибольшее влияние на скорость решения поставленной задачи испытуемыми по сравнению с другими составляющими модели эксперимента по исследованию восприятия информации (рисунок 1).
2. При исследовании факторов фонового выделения и цвета в совокупности наблюдается влияние цветового решения на восприятие информации пользователем. При этом не было выявлено влияния цвета отдельно от фона на восприятие контента на веб-ресурсе, чтобы сделать вывод о наличии закономерностей скорости восприятия требуемой информации испытуемыми только от цветового решения.
3. Представленные данные свидетельствуют о том, что не было выявлено влияния фактора композиционного решения на восприятие контента при решении поставленной задачи в рассматриваемой среде, а потому он может быть исключен из дальнейшего изучения.
4. Полученные результаты требуют проведения дальнейших исследований сочетания факторов фонового выделения и цветового решения.

Список источников

1. Velasquez J. D. Combining eye-tracking technologies with web usage mining for identifying. Engineering applications of Artificial Intelligence, 2013, vol. 26, iss. 5-6, pp. 1469-1478, DOI: 10.1016/j.engappai.2013.01.003.
2. Кириллова О.С. Особенности построения классификаций современных веб-сайтов / О.С. Кириллова, С.М. Газуль, С.А. Демченко // ГИПОТЕЗА, 2021. – №1 (14). – С. 34-40. – EDN: LUZZBP.
3. Majooni A., Masood M., Akhavan A. Scientific visualizations based on integrated model of text and picture comprehension via eye-tracking. Procedia –social and behavioral sciences, 2015, vol. 176, pp. 52–59, DOI:10.1016/j.sbspro.2015.01.443.
4. Муромцев В.В. Особенности представления информации на страницах сайта / В.В. Муромцев, А.В. Муромцева // Вестник РГГУ. Серия: экономика. Управление. Право, 2013. – № 6. – С. 179-187.
5. Белоедова А.В. Предъявление научного знания в диалоге медиа: контексты, технологии и языковые техники (серия «язык в координатах массмедиа»): коллективная монография. / А.В. Белоедова, Е.В. Выровцева, Т.В. Дубровская и др. – Санкт-Петербург: Медиапапир, 2023. – 223 с.
6. Колесов И.Ю. Проблемы концептуализации и языковой репрезентации зрительного восприятия: монография. / И.Ю. Колесов. – Барнаул: БГПУ, 2008. – 354 с.
7. Nowakowski M. The impact of user's highly sensory processing sensitivity on websites' information usefulness perception. Procedia computer science, 2021, vol. 192, pp. 4980-4990. DOI: 10.1016/j.procs.2021.09.276.
8. Фаликман М.В. Принципы физиологии активности Н.А. Бернштейна в психологии восприятия и внимания: проблемы и перспективы / М.В. Фаликман, Е.В. Печенкова // Культурно-историческая психология, 2016. – Т. 12. № 4. – С. 48-66. – DOI: 10.17759/chp.2016120405.
9. Pellicer-Sanchez A., Perez M.M. Eye-tracking in vocabulary research: Introduction to the special issue. Research methods in applied linguistics, 2024, vol. 3, iss. 1, DOI: 10.1016/j.rmal.2024.100095.
10. Almourad M.B., Botaineh E., Hussain M. et al. Usability assessment of a university academic portal using eye tracking technology. Procedia computer science, 2023, vol. 220, pp. 323-330, DOI: 10.1016/j.procs.2023.03.042.
11. Carter B.T., Luke S.G. Best practices in eye tracking research. International journal of psychology, 2020, vol. 155, pp. 49-62, DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2020.05.010.
12. Филин В.А. Автоматия саккад / В.А. Филин // М.: Изд-во МГУ, 2002. – 240 с.
13. Орлов П.А. К вопросу о применении систем ай-трекинга / П.А. Орлов, В.В. Лаптев, В.М. Иванов // Информатика, телекоммуникации и управление, 2014. – № 5 (205). – С. 82-92.
14. Кукульян В.Ю. Исследование восприятия стилизованного текста в процессе профессионального перевода с использованием технологии ай-трекинга / В.Ю. Кукульян, В.Э. Янчус // Труды международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон», 2023. – № 33. – С. 938-947. – DOI: 10.20948/graphicon-2023-938-947. – EDN: COVQQD.
15. Малышева В.Н. Влияние гендерного признака на восприятие информации в графическом интерфейсе под физической нагрузкой / В.Н. Малышева, Г.А. Черепенников, В.Э. Янчус // Труды международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон», 2023. – № 33. – С. 948-958. – DOI: 10.20948/graphicon-2023-948-958.
16. Янчус В.Э. Информационная модель восприятия визуальной информации человеком / В.Э. Янчус // Труды международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон», 2023. – № 33. – С. 969-975. – DOI: 10.20948/graphicon-2023-969-975.
17. Chen J., Zhang L., Lu Q. How readers attentive and inattentive to task-related information scan: An eye-tracking study. Data and information management. 2024, vol.8, iss. 4, DOI:10.1016/j.dim.2024.100073.
18. Wlekty P., Piwowarski M. The usability of eye tracking in the design of digital training materials. Procedia computer science, 2022, vol. 207, pp. 4180-4189, DOI:10.1016/j.procs.2022.09.481.
19. Юрьев Ф.И. Гармония сфер: в 2 тт. Т. 2. Цветовая образность информации / Ф.И. Юрьев. – Киев: ЭКОГИНТОКС, 2007. – 327 с.
20. Тидвелл Дж. Разработка интерфейсов. Паттерны проектирования. 3-е изд. / Дж. Тидвелл. – СПб: Питер, 2022. – 560 с.
21. Смирнова А.К. Исследование восприятия информации на сайте с помощью технологии ай-трекинга / А.К. Смирнова, В.Э. Янчус // Неделя науки ИСИ. Сборник материалов Всероссийской конференции, 2024. – С. 177-179. – EDN: MBGWSN.
22. Bortko K., Bartkow P., Jankowski J. Et al. Multi-criteria evaluation of recommending interfaces towards habituation reduction and limited negative impact on user experience. Procedia computer science, 2019, vol. 159, pp. 2240-2248, DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.399.

23. Бабанова К.Ю. Метод айтрекинга в исследовании чтения / К.Ю. Бабанова // Новые исследования, 2024. – № 1. – С. 90-98. – DOI: 10.46742/2949-5377-2024-77-1-90-98.

24. Шеффе Г. Дисперсионный анализ 2-е изд. / Г. Шеффе. – Москва: Наука, 1980. – 512 с.

Смирнова Александра Константиновна. Магистрант. Студент высшей школы дизайна и архитектуры СПбПУ Петра Великого. AuthorID: 1278412, SPIN: 1978-0061, ORCID: 0009-0006-2338-1020, smirnova2.ak@gmail.com, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Янчус Виктор Эдмундасович. Кандидат технических наук. Доцент высшей школы дизайна и архитектуры СПбПУ Петра Великого. Основные направления исследований: Механизмы восприятия зрительной информации. AuthorID: 692478, SPIN: 9700-3934, ORCID: 0000-0001-7220-0819, vic.phd.2019@gmail.com, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Титов Максим Сергеевич. Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0009-2279-6699, woronowo2003titiva@gmail.com, 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

Юдин Андрей Николаевич. Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0007-5300-8005, andrey.yudin.nikolae@yandex.ru, 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

Нургалеев Тимур Рустемович. Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0007-9067-5739, nurgaleevtimur04@gmail.com, 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

Бulychev Дмитрий Андреевич. Магистрант. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0008-5316-1891, bulychev_14d@mail.ru. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

Михайлов Илья Андреевич. Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0009-1452-6250, Ilmi20072003@gmail.com, 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

UDC 004.925.5

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.017

The study of the perception of an educational WEB-resource by users using eye tracking technology

Aleksandra K. Smirnova¹, Viktor E. Yanchus¹, Maxim S. Titov², Andrei N. Yudin², Timur R. Nurgaleev², Dmitry A. Bulychev²

¹Peter the Great St. Petersburg polytechnic university,
Russia, Saint Petersburg, vic.phd.2019@gmail.com

²MIREA – Russian technological university,
Russia, Moscow

Abstract. This article presents the results of a study of the factors of managing user attention and improving the perception of visual information on highly loaded educational portals. The design of information websites has a significant impact on the efficiency of information transmission within the framework of content overload. The results served as the basis for changing the stimulus material in order to identify statistical patterns. The experiment was conducted using eye tracking technology and included 16 stimuli and 6 tasks. As a result of the analysis of variance, the influence of the combination of color scheme and background text selection on the speed of content perception was revealed. The speed of perception is a criterion for evaluating the effectiveness of human-computer interaction and data interpretation. The above research can be the basis for further experiments and the development of recommendations for the design of effective information web resources.

Keywords: Eye-tracking technology, experiment, stimulus material, perception of visual information, information web resource, mathematical statistics

References

1. Velasquez J.D. Combining eye-tracking technologies with web usage mining for identifying. Engineering applications of Artificial Intelligence, 2013, vol. 26, iss. 5-6, pp. 1469-1478, DOI: 10.1016/j.engappai.2013.01.003.
2. Kirillova O.S., Gazul S.M., Demchenko S.A. Osobennosti postroyeniya klassifikatsiy sovremennykh veb-saytov [Features of building classifications of modern websites]. GIPOTEZA [HYPOTHESIS], 2021, no. 1 (14). pp. 34-40, EDN: LUZZBP.
3. Majooni A., Masood M., Akhavan A. Scientific visualizations based on integrated model of text and picture comprehension via eye-tracking. Procedia –social and behavioral sciences, 2015, vol. 176, pp. 52–59, DOI:10.1016/j.sbspro.2015.01.443.
4. Muromtsev V.V., Muromtseva A.V. Osobennosti predstavleniya informatsii na stranitsakh sayta [Features of the presentation of information on the pages of the site]. Vestnik RGGU. Seriya: ekonomika. Upravleniye. Pravo [Bulletin of the Russian state university. SERIES: Economics, Management, Law], 2013, no.6, pp. 179-187.
5. Beloedova A.V., Levantseva E.V., Dubrovskaya T.V. et al. Pred"yavleniye nauchnogo znaniya v dialoge media: konteksty, tekhnologii i yazykovyye tekhniki (seriya "yazyk v koordinatakh massmedia"): kollektivnaya monografiya [Presentation of scientific knowledge in the dialogue of media: contexts, technologies and language techniques (series "language in the coordinates of mass media"): a collective monograph]. Sankt-Peterburg: Mediapapir [St. Petersburg: Mediapapir], 2023, 223 p.
6. Kolesov I.Y. Problemy kontseptualizatsii i yazykovoy reprezentatsii zritel'nogo vospriyatiya: monografiya [Problems of conceptualization and linguistic representation of visual perception: monograph]. Barnaul: BGPU [Barnaul: BSPU], 2008, 354 p.
7. Nowakowski M. The impact of user's highly sensory processing sensitivity on websites' information usefulness perception. Procedia computer science, 2021, vol. 192, pp. 4980-4990. DOI: 10.1016/j.procs.2021.09.276.
8. Falikman M.V., Pechenkova E.V. Printsipy fiziologii aktivnosti N.A. Bernshteyna v psikhologii vospriyatiya i vnimaniya: problemy i perspektivy [Principles of the physiology of N.A. Bernstein's activity in the psychology of perception and attention: problems and prospects]. Cultural and historical psychology, 2016, vol. 12, no.4, pp. 48-66, DOI: 10.17759/chp.2016120405.
9. Pellicer-Sanchez A., Perez M.M. Eye-tracking in vocabulary research: Introduction to the special issue. Research methods in applied linguistics, 2024, vol. 3, iss. 1, DOI: 10.1016/j.rmal.2024.100095.
10. Almourad M.B., Botaineh E., Hussain M. et al. Usability assessment of a university academic portal using eye tracking technology. Procedia computer science, 2023, vol. 220, pp. 323-330, DOI: 10.1016/j.procs.2023.03.042.
11. Carter B.T., Luke S.G. Best practices in eye tracking research. International journal of psychology, 2020, vol. 155, pp. 49-62, DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2020.05.010.
12. Filin V.A. Avtomatiya sakkad [Automaticity of saccadic]. M.: Izd-vo MGU [Moscow: MGU Publ.], 2002, 240 p.
13. Orlov P.A., Laptev V.V., Ivanov V.M. K voprosu o primeneniі sistem ay-trekinga [On the issue of the use of AI-tracking systems]. Informatika, telekommunikatsii i upravleniye [Informatics, telecommunications and management], 2014, no.5, (205), pp. 82-92.
14. Kukulyan V.Yu., Yanchus V.E. Issledovaniye vospriyatiya stilizovannogo teksta v protsesse professional'nogo perevoda s ispol'zovaniyem tekhnologii ay-trekinga [The study of perception of stylized text in the process of professional translation using AI-tracking technology]. Trudy mezhdunarodnoy konferentsii po komp'yuternoy grafike i zreniyu "Grafikon" [Proceedings of the international conference on computer graphics and vision "Graphicon"], 2023, no.33, pp. 938-947, DOI: 10.20948/graphicon-2023-938-947, EDN: COVQQD.
15. Malysheva V.N. Cherepennikov G.A., Yanchus V.E. Vliyaniye gendernogo priznaka na vospriyatiye informatsii v graficheskom interfeyse pod fizicheskoy nagruzkoy [The influence of gender on the perception of information in the graphical interface under physical exertion]. Trudy mezhdunarodnoy konferentsii po komp'yuternoy grafike i zreniyu "Grafikon" [Proceedings of the international conference on computer graphics and vision "Graphicon"], 2023, no.33, pp. 948-958, DOI: 10.20948/graphicon-2023-948-958.
16. Yanchus V.E. Informatsionnaya model' vospriyatiya vizual'noy informatsii chelovekom [Information model of human perception of visual information]. Trudy mezhdunarodnoy konferentsii po komp'yuternoy grafike i zreniyu "Grafikon" [Proceedings of the international conference on computer graphics and vision "Graphicon"], 2023, no.33, pp. 969–975, DOI: 10.20948/graphicon-2023-969-975.
17. Chen J., Zhang L., Lu Q. How readers attentive and inattentive to task-related information scan: An eye-tracking study. Data and information management. 2024, vol.8, iss. 4, DOI:10.1016/j.dim.2024.100073.
18. Wlekty P., Piwowarski M. The usability of eye tracking in the design of digital training materials. Procedia computer science, 2022, vol. 207, pp. 4180-4189, DOI:10.1016/j.procs.2022.09.481.

19. Yuryev F.I. *Garmoniya sfer: v 2 tt. T. 2. Tsvetovaya obraznost' informatsii* [Harmony of spheres: in 2 volumes. Vol. 2. Color imagery of information]. Kiyev: EKOINTOKS [Kiev: ECOGINTOX], 2007, 327 p.
20. Tidwell J. *Razrabotka interfeysov. Patterny proyektirovaniya. 3-ye izd.* [Interface development. Design patterns. 3rd ed.]. SPb: Piter [St. Petersburg: St. Petersburg], 2022, 560 p.
21. Smirnova A.K., Yanchus V.E. *Issledovaniye vospriyatiya informatsii na sayte s pomoshch'yu tekhnologii aytrekinga* [Research of information perception on the site using AI-tracking technology]. *Nedelya nauki ISI. Sbornik materialov Vserossiyskoy konferentsii* [ISI Science week. Collection of materials of the All-Russian conference], 2024, pp. 177-179, EDN: MBGWSN.
22. Bortko K., Bartkow P., Jankowski J. et al. Multi-criteria evaluation of recommending interfaces towards habituation reduction and limited negative impact on user experience. *Procedia computer science*, 2019, vol. 159, pp. 2240-2248, DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.399.
23. Babanova K.Yu. *Metod aytrekinga v issledovanii chteniya* [The eytracking method in the study of reading]. *Novyye issledovaniya* [New studies], 2024, no. 1, pp. 90-98.
24. Scheffe G. *Dispersionnyy analiz: 2-ye izd.* [Analysis of variance: 2nd ed.]. Moskva: Nauka [Moscow: Nauka], 1980, 512 p.

Smirnova Aleksandra Konstantinovna. Master's student. Student of the Higher school of design and architecture, Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. AuthorID: 1278412, SPIN: 1978-0061, ORCID: 0009-0006-2338-1020, smirnova2.ak@gmail.com, 195251, Russia, Saint Petersburg, Politekhnikeskaya st., 29.

Yanchus Viktor Edmundasovich. Associate Professor, Department of higher school of design and architecture, Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. AuthorID: 692478, SPIN: 1549-9236, ORCID: 0000-0001-7220-0819, vic.phd.2019@gmail.com, 95251, Russia, Saint Petersburg, Politekhnikeskaya st., 29.

Titov Maxim Sergeevich. Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0009-2279-6699, woronowo2003titiva@gmail.com, 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.

Yudin Andrei Nikolaevich. Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0007-5300-8005, andrey.yudin.nikolae@yandex.ru, 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.

Nurgaleev Timur Rustemovich. Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0007-9067-5739, nurgaleevtimur04@gmail.com, 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.

Bulychev Dmitry Andreevich. Master's student. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0008-5316-1891, bulychev_14d@mail.ru, 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.

Mikhailov Ilya Andreevich. Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0009-1452-6250, Ilmi20072003@gmail.com, 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.

Статья поступила в редакцию 23.02.2025; одобрена после рецензирования 18.04.2025; принята к публикации 24.04.2025.

The article was submitted 02/23/2025; approved after reviewing 04/18/2025; accepted for publication 04/24/2025.

