



№6-2025

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Алгоритмы обработки информации
- Анализ данных, моделирование и управление
- Электроника, нанотехнологии и приборостроение
- Машинное обучение и нейронные сети

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

Федеральная служба по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи
и охраны культурного наследия

Научно-технический и прикладной журнал

Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»

Подписной индекс ПС704

№ 6 (248). 2025 г.

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Редакционный совет

Курейчик В.В. (гл. редактор); Кравченко Ю.А. (зам. гл. редактора); Бородянский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Боженюк А.В.; Борисов В.В.; Веселов Г.Е.; Гайдук А.Р.; Горбанёва О.И.; Еремеев А.П.; Зинченко Л.А.; Каляев И.А.; Касьянов А.О.; Коноплев Б.Г.; Коробейников А.Г.; Кравец А.Г.; Куповых Г.В.; Левин И.И.; Магид Е.А.; Массель Л.В.; Медведев М.Ю.; Мельник Э.В.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Сергеев Н.Е.; Середин Б.М.; Сидоркина И.Г.; Стемпковский А.Л.; Сухинов А.И.; Турулин И.И.; Тютиков В.В.; Угольницкий Г.А.; Целых А.Н.; Юханов Ю.В.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственные за выпуск: Клевцов С.И., Самойлов А.Н.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 30.12. 2025 г. Формат $70 \times 108 \frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 26,2. Уч.-изд. л. – 19,5.

Заказ № 10298. Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8(863)243-41-66.

Адрес типографии: Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8(863)243-41-66.

Адрес редакции: 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, ЮФУ, тел. +7 (928) 909-57-82, e-mail: iborodyanskiy@sfedu.ru, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Е.М. Герасименко, П.С. Герасименко АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ БОЛЬШИХ ГРУПП ЭКСПЕРТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНТЕРПРЕТАЦИОННОГО СТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	6
О.М. Голозубов, А.В. Козловский, Э.В. Мельник, Я.Э. Мельник, А.Н. Самойлов ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДЕКАДНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО ВЗВЕШИВАНИЯ ПО РАССТОЯНИЮ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКОЙ МНОЖЕСТВЕННЫХ ВРЕМЕННЫХ СРЕЗОВ	22
А.А. Диченко, И.И. Левин, Д.А. Сорокин МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.....	33

РАЗДЕЛ II. АНАЛИЗ ДАННЫХ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ

А.А. Белевцев, А.М. Белевцев, В.А. Балыбердин АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ ПРИОРИТЕТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ В УСЛОВИЯХ СВЯЗНОСТИ КРИТЕРИЕВ И ТЕХНОЛОГИЙ.....	47
Н.Д. Болдырев, В.В. Гилка, А.С. Кузнецова, Д.А. Морозов СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОНИТОРИНГУ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ: ОБЗОР И КОНЦЕПЦИЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ БПЛА.....	58
И.А. Бондин МЕТОДИКА КУСОЧНОЙ АППРОКСИМАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОЛИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛЕГАНИЯ	81
А.А. Дорофеев МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СПЛАЙНОВЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ	90
А.А. Коблов, О.М. Ромакина, А.С. Клемешева, А.З. Арсеньева ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МУЛЬТИМОДЕЛЬНЫХ ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ В ИГРОВОЙ ИНДУСТРИИ.....	105
А.К. Мельников ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОННЫХ И КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ЗНАЧЕНИЙ СТАТИСТИК КОНЕЧНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ.....	121
И.Н. Розенберг, И.А. Дубчак ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНВАРИАНТОВ НЕЧЕТКОГО ГРАФА ДЛЯ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ.....	136
Е.В. Карачанская, О.В. Рыбкина ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАЩИЩЕННОЙ ОТ ЗАРАЖЕНИЯ ВИРУСАМИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ SIR-МОДЕЛИ	145
А.И. Гусева, Р.М. Романов МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ, ОСНОВАННЫЙ НА КОГНИТИВНОМ НЕЧЕТКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ И РЕГРЕССИОННОМ АНАЛИЗЕ.....	157

А.Ф. Зайцев ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АГЕНТНО-МОДУЛЬНОГО ПОДХОДА ПРИ ПОСТРОЕНИИ И РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.....	179
--	-----

Д.Г. Веселова, Н.Е. Сергеев СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОГНИТИВНОГО РИСКА ТРЕЙДЕРОВ В УСЛОВИЯХ ВОЛАТИЛЬНОСТИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ РЫНКОВ	189
--	-----

РАЗДЕЛ III. ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Р.В. Томинов, З.Е. Вакулов, В.И. Варганов, И.О. Игнатьева, В.А. Смирнов ИССЛЕДОВАНИЕ СИНАПТИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕМРИСТИВНЫХ CROSS-POINT СТРУКТУР ДЛЯ НЕЙРОМОРФНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	200
---	-----

А.С. Мамитов, К.Е. Румянцев ФОРМИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МОДУЛЯЦИЕЙ КВАДРАТУРНЫМ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫМ РАДИОСИГНАЛОМ.....	207
---	-----

Д.И. Бакшун, И.И. Турулин ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕКУРСИВНОГО ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ В ВИДЕ СУММЫ КВАЗИГАРМОНИК УСЕЧЕННОГО РЯДА ФУРЬЕ	221
---	-----

РАЗДЕЛ IV. МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

Н.А. Бочаров, Н.Б. Парамонов ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	229
--	-----

П.Г. Букина, А.А. Меринов, С.С. Харченко, Е.Ю. Костюченко РАСПОЗНАВАНИЕ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В РУССКОЯЗЫЧНОЙ РЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MFCC-ПРИЗНАКОВ И VLSTM-МОДЕЛИ ДЛЯ НАБОРА ДАННЫХ «DUSHA»	240
---	-----

Ж.Х. Мохаммад МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ И ОЦЕНКИ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРСОНАЛИЗАЦИИ КОНТЕНТА	248
--	-----

В.И. Данильченко, В.В. Бова ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ БАС	263
--	-----

Б.А. Комаров, С.В. Леонов, Т.Е. Мамонова НЕЙРОСЕТЕВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА	276
--	-----

А.И. Татауров, В.Е. Вавилов АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННЫХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ В РОБОТОТЕХНИКЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГИБРИДНЫХ ПОДХОДОВ	287
---	-----

CONTENT

SECTION I. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

E.M. Gerasimenko, P.S. Gerasimenko CLUSTERING ALGORITHM FOR LARGE GROUPS OF EXPERTS BASED ON THE INTERPRETIVE STRUCTURAL MODELING METHOD.....	6
O.M. Golozubov, A.V. Kozlovskiy, E.V. Melnik, Y.E. Melnik, A.N. Samoilo OPTIMIZATION OF THE COMPUTATIONAL SCHEME FOR THE INTERPOLATION OF DECADAL METEOROLOGICAL DATA BY INVERSE DISTANCE WEIGHTING WITH PARALLEL PROCESSING OF MULTIPLE TIME SLICES	22
A.A. Dichenko, I.I. Levin, D.A. Sorokin METHOD FOR GENERATING TOPOLOGICAL CONSTRAINTS OF COMPUTATIONAL STRUCTURES FOR RECONFIGURABLE COMPUTING SYSTEMS	33

SECTION II. DATA ANALYSIS, MODELING AND CONTROL

A.A. Belevtsev, A.M. Belevtsev, V.A. Balyberdin ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING BIG LANGUAGE MODELS FOR MONITORING TECHNOLOGICAL TRENDS AND DETERMINING DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF HIGH-TECH ENTERPRISES	47
N.D. Boldyrev, V.V. Gilka, A.S. Kuznetsova, D.A. Morozov MODERN APPROACHES TO NATURAL FIRE MONITORING AND FORECASTING: REVIEW AND CONCEPT OF AUTONOMOUS UAV-BASED SYSTEM	59
I.A. Bondin THE METHOD OF PIECEWISE APPROXIMATION OF STATIC CHARACTERISTICS OF DEEP-LYING HYDROLITHOSPHERIC PROCESSES	81
A.A. Dorofeev THE TECHNIQUE FOR SPLINE APPROXIMATIONS BUILDING IN CONDITIONS OF LIMITED SOURCE DATA	90
A.A. Koblov, O.M. Romakina, A.S. Klemesheva, A.Z. Arseneva INVESTIGATION OF APPLICABILITY OF MULTIMODEL DATA WAREHOUSES IN GAMING INDUSTRY	106
A.K. Melnikov STUDY OF POSSIBILITIES OF USING PHOTONIC AND QUANTUM COMPUTING TECHNOLOGIES TO CALCULATE EXACT PROBABILITY DISTRIBUTIONS OF STATISTIC VALUES FROM FINITE DISCRETE SEQUENCES.....	122
I.N. Rozenberg, I.A. Dubchak USING FUZZY GRAPH INVARIANTS FOR THE STABILITY ANALYSIS OF COMPLEX TRANSPORT SYSTEMS.....	136
E.V. Karachanskaya, O.V. Rybkina CONSTRUCTING A MATHEMATICAL MODEL OF A VIRUS-PROTECTED INFORMATION SYSTEM BASED ON SIR-MODEL	146
A.I. Guseva, R.M. Romanov A TIME SERIES FORECASTING METHOD BASED ON COGNITIVE FUZZY MODELING AND REGRESSION ANALYSIS	158
A.F. Zaytsev FEATURES OF THE AGENT-MODULAR APPROACH APPLICATION IN THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF INFORMATION-COMPUTATIONAL SYSTEMS.....	179
D.G. Veselova, N.E. Sergeev A STOCHASTIC FRAMEWORK FOR MODELING TRADERS' COGNITIVE RISK UNDER VOLATILITY IN DECENTRALIZED FINANCIAL MARKETS.....	190

**SECTION III. ELECTRONICS, NANOTECHNOLOGY
AND INSTRUMENTATION**

R.V. Tominov, Z.E. Vakulov, V.I. Varganov, I.O. Ignatieva, V.A. Smirnov	
INVESTIGATION OF SYNAPTIC PLASTICITY IN MEMRISTIVE CROSS-POINT STRUCTURES FOR NEUROMORPHIC ROBOTIC SYSTEMS.....	200
A.S. Mamitov, K.E. Rumyantsev	
GENERATION OF COHERENT OPTICAL RADIATION MODULATED BY A QUADRATURE PHASE-SHIFT KEYED RADIO SIGNAL	208
D.I. Bakshun, I.I. Turulin	
FORMATION OF THE IMPULSE RESPONSE OF A RECURSIVE LOW-PASS FILTER WITH FINITE IMPULSE RESPONSE AS A SUM OF QUASI-HARMONICS OF A TRUNCATED FOURIER SERIES.....	221

**SECTION IV. MACHINE LEARNING
AND NEURAL NETWORKS**

N.A. Bocharov, N.B. Paramonov	
PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF QUANTUM COMPUTING IN ONBOARD COMPUTING SYSTEMS OF ROBOTIC COMPLEXES.....	229
P.G. Bukina, A.A. Merinov, S.S. Kharchenko, E.Y. Kostyuchenko	
RECOGNITION OF EMOTIONAL STATES IN RUSSIAN SPEECH USING MFCC FUNCTIONS AND THE BLSTM MODEL FOR THE DUSHA DATASET	240
J.H. Mohammad	
METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING AND EVALUATING AN ONTOLOGICAL PROFILE FOR CONTENT PERSONALIZATION SYSTEMS: STAGES AND EVALUATION CRITERIA	249
V.I. Danilchenko, V.V. Bova	
INTELLIGENT METHODS OF PARAMETRIC FORECASTING AND OPTIMIZATION OF UAV TRAJECTORIES	263
B.A. Komarov, S.V. Leonov, T.E. Mamonova	
NEURAL NETWORK APPROXIMATION OF MODEL-PREDICTIVE CONTROL FOR A DYNAMIC OBJECT STABILIZATION SYSTEM	277
A.I. Tataurov, V.E. Vavilov	
ANALYSIS OF TRADITIONAL AND NEURAL NETWORK-BASED CONTROL METHODS FOR ELECTRIC DRIVES IN ROBOTICS AND PERSPECTIVES OF HYBRID APPROACHES.....	288

Раздел I. Алгоритмы обработки информации

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-6-21

Е.М. Герасименко, П.С. Герасименко

АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ БОЛЬШИХ ГРУПП ЭКСПЕРТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНТЕРПРЕТАЦИОННОГО СТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представлен алгоритм для достижения консенсуса в социальных сетях при крупномасштабном групповом принятии решений с неполной вероятностной нечёткой информацией с элементами неуверенности, который учитывает доверительные отношения экспертов. Предложен метод кластеризации экспертов на основе интерпретационного структурного моделирования для классификации экспертов, а также для повышения эффективности достижения консенсуса. Разработаны операторы распространения и агрегирования доверия для вероятностной нечёткой информации с элементами неопределённости, которые позволяют проводить косвенную оценку доверия и определять весовые коэффициенты экспертов. В результате удаётся сформировать несколько подмножеств экспертов; определить весовые коэффициенты для большого числа экспертов на основе их взаимных отношений доверия. На основе кластеризации экспертов и вычисленного косвенного отношения доверия между экспертами осуществляется принятие решений в ЧС за счет достижения консенсуса с учетом колеблющейся вероятностной нечеткой информации и определяется наилучшая эвакуационная альтернатива. Оценки, предоставляемые экспертами в виде вероятностных колеблющихся нечётких значений, позволяют эффективно моделировать сомнения, неуверенность, несогласованность экспертов в оценках в случае участия группы экспертов или различных экспертных организаций. Вместе с тем становится возможным учитывать различные значения оценок экспертов в задачах принятия многокритериальных решений, когда эксперты не могут согласовать общие степени принадлежности. Алгоритм позволяет классифицировать большую группу экспертов на несколько подмножеств на основе их отношений социального доверия. Этот метод исключает получение пересекающихся подмножеств, при этом нет необходимости заранее задавать параметры кластеризации. Метод использует исключительно отношения социального доверия между экспертами, тем самым обходя проблему субъективного вмешательства в процесс кластеризации. По сравнению с традиционными методами кластеризации метод кластеризации на основе метода интерпретационного структурного моделирования позволяет эффективно выявить иерархическую структуру взаимоотношений между экспертами и минимизировать число участников крупномасштабного группового принятия решений в социальной сети за счет снижения размерности множества экспертов. Кластеризация экспертов на основе метода интерпретационного структурного моделирования существенно повышает эффективность и реализуемость крупномасштабного группового принятия решений.

Эвакуационное принятие решений; крупномасштабное принятие решений; достижение консенсуса; операторы распространения доверия и агрегирования; интерпретационное структурное моделирование.

E.M. Gerasimenko. P.S. Gerasimenko

CLUSTERING ALGORITHM FOR LARGE GROUPS OF EXPERTS BASED ON THE INTERPRETIVE STRUCTURAL MODELING METHOD

This article presents an algorithm for achieving consensus in social networks during large-scale group decision-making with incomplete probabilistic fuzzy information containing elements of uncertainty, which takes into account the trust relationships among experts. A method for clustering experts based on interpretive structural modelling is proposed. It serves both to classify experts and to enhance the efficiency of consensus achievement. The study examines trust propagation and aggregation operators for probabilistic fuzzy information with elements of uncertainty. These operators enable indirect trust assessment

and determination of experts' weight coefficients. As a result, it becomes possible to form several subsets of experts and to determine weight coefficients for a large number of experts based on their mutual trust relationships. Based on the clustering of experts and the calculated indirect trust relationship between experts, decision-making in emergency situations is carried out by achieving consensus, taking into account fluctuating probabilistic fuzzy information, and the best evacuation alternative is identified. The assessments provided by experts in the form of probabilistic fluctuating fuzzy values allow for effective modelling of doubts, uncertainty, and inconsistencies in expert evaluations when a group of experts or various expert organisations are involved. At the same time, it becomes possible to take into account different expert assessment values in multi-criteria decision-making tasks when experts cannot agree on common membership degrees. The algorithm allows classifying a large group of experts into several subsets based on their social trust relationships. This method prevents the formation of overlapping subsets and does not require pre-setting clustering parameters. It relies exclusively on social trust relationships between experts, thereby avoiding the issue of subjective intervention in the clustering process. Compared to traditional clustering methods, the interpretive structural modelling-based clustering approach effectively reveals the hierarchical structure of relationships among experts. It also minimizes the number of participants in large-scale group decision-making within a social network by reducing the dimensionality of the expert set. Clustering experts based on the interpretive structural modelling method significantly enhances the efficiency and feasibility of large-scale group decision-making.

Emergency decision-making; consensus reaching; large-scale group decision-making; trust propagation and aggregation operators; interpretive structural modelling.

Введение. В последние годы чрезвычайные ситуации (ЧС) часто происходят по всему миру, что нередко приводит к разрушительным последствиям. Принятие решений в ЧС характеризуется временными ограничениями, частичной или неполной информацией, а также давлением на экспертов при принятии решений, поэтому принятие решений в ЧС представляет собой серьезную проблему как для государства, так и для общества. ЧС предъявляют высокие требования к качеству принимаемых решений. Однако на практике очень трудно достичь единогласного мнения между лицами, принимающими решения (ЛПР), в случае, когда их больше 20, при этом не ущемив позиции меньшинства. В этой связи различия во мнениях и предпочтениях между ЛПР неизбежны, что делает актуальной задачу разработки эффективных моделей консенсуса. При этом необходимо вовлечение большого числа экспертов из разных областей для эффективного принятия решения в условиях масштабной ЧС, а на его основе – разработка усовершенствованных моделей консенсуса для коллективного принятия решений в больших экспертных группах (КПРБЭГ, от англ. Large Scale Group Decision Making – LSGDM) в условиях ЧС к управлению мнениями меньшинства и их неконструктивным поведением. Вместе с тем, на практике из-за временных ограничений, различий в образовательном уровне или ограниченности знаний большим группам экспертов трудно представлять свои полные оценки по планам действий в ЧС и эвакуационным альтернативам в четком виде. В этой связи важной задачей является задача разработки новых подходов к КПРБЭГ в ЧС с учетом обобщений нечётких множеств, таких как интуиционистские, колеблющиеся и лингвистические нечёткие множества, позволяющих всесторонне учесть сомнения, колебания экспертов, их неуверенность в выборе степени принадлежности, возможность задания оценки в лингвистической, а не в числовой форме.

С развитием информационных технологий и экономики число людей, вовлеченных в процесс принятия решений, резко возросло [1]. С ростом сложности задач принятия решений применение КПРБЭГ – модели в теории принятия решений, которая описывает ситуации с участием более 20 экспертов [2] – становится всё более популярным. Например, при определении плана лечения эпидемического заболевания, такого как COVID-19, или при завершении крупного инженерного проекта к принятию решений привлекаются многие специалисты из разных областей. Таким образом, формируется крупномасштабная группа принятия решений. Цель КПРБЭГ – координировать различия во мнениях между экспертами для выбора альтернативы, которая наилучшим образом признается всеми экспертами.

В последние годы КПРБЭГ приобрело особую актуальность и применялось в различных областях, таких как принятие решений в чрезвычайных ситуациях [3], управление здравоохранением [2] и экономика [4]. Существующие исследования КПРБЭГ можно

условно разделить на две категории. Для первой категории [5] характерно, что эксперты в КПРБЭГ независимы, а вторая категория [6] допускает, что существуют некоторые социальные модели поведения среди экспертов. Например, Джао и др. [7] исследовали задачи КПРБЭГ первой категории с нечеткими лингвистическими наборами терминов и построили модель обратной связи глобальной оптимизации с использованием оптимизации роя частиц (ОРЧ), учитывая стоимость корректировки консенсуса несогласованных экспертов. В рамках сети социального доверия экспертов Джи и др. [8] исследовали КПРБЭГ с лингвистическими переменными из двух кортежей и построили механизм обратной связи, управляемый сообществом, для поддержки консенсуса.

Из-за сложности реальных задач и неоднозначности человеческих суждений ЛПР сложно выражать свои оценки альтернатив действительными числами. В этой связи, информация, представленная в КПРБЭГ, характеризуется неопределенностью и сложностью, что потенциально делает информацию о принимаемом решении неопределенной и нечеткой. Чтобы охарактеризовать неуверенность ЛПР в процессе принятия решений, Л. Заде [9] ввел нечеткое множество, которое использует функцию принадлежности для описания степени принадлежности элемента множеству. Однако, поскольку нечеткое множество выражает неопределенность в виде задания одной степени принадлежности, оно не может описать сомнения ЛПР при выборе нескольких возможных степеней принадлежности. Поэтому Торра [10] расширил понятие нечеткого множества и предложил концепцию «колеблющегося нечеткого множества (КНМ)» для точной количественной оценки колеблющейся информации, позволяющего ЛПР предоставлять набор из нескольких возможных значений на основе функции принадлежности. Например, при оценке фильмов по десятибалльной шкале пользователь присваивает конкретному фильму оценку 7, при этом считается, что принадлежность этого балла данной оценке фильма «хороший фильм» равна 0,7. Аналогично, принадлежность оценки 6 оценке «хороший фильм» равна 0,6. Предположим, пользователь колеблется между оценками 6 и 7 при составлении отзыва, тогда принадлежность реального балла этого отзыва оценке «хороший фильм» можно выразить с помощью КНМ $\{0,6,0,7\}$, что точнее, чем нечеткое значение 0,6 или 0,7, или интервальное число $[0,6, 0,7]$. В этом смысле КНМ может точно описывать информацию о принятом решении. До настоящего времени КНМ применялись в различных областях и решали множество проблем принятия решений, таких как управление гостиницами, человеческие ресурсы и экономическое развитие [11].

Однако КНМ не может учитывать вероятность появления каждой степени принадлежности, для чего автором Чжу [12] были предложены вероятностные колеблющиеся нечеткие множества (В-КНМ), включающие вероятностное значение степени принадлежности КНМ. Данная модификация позволяет выражать информацию более точно по сравнению с традиционными КНМ. Авторы Чжан и Ву [13] исследовали некоторые операции над взвешенными колеблющимися нечеткими множествами и представили возможности их применения для многокритериального принятия решений.

В последние годы КНМ привлекли значительное внимание исследователей, и работы в этой области достигли существенных результатов. Среди ключевых достижений можно выделить: функции оценки [14], операторы агрегирования [15], методы принятия решений [16].

Функции оценки играют фундаментальную роль в ранжировании альтернатив при решении задач принятия решений с использованием КНМ. Значительное количество ученых посвятило свои исследования разработке и изучению функций оценки, предложив различные подходы с разных методологических позиций.

В частности, Хиа и Ху [17] первыми определили функцию оценки путем усреднения возможных значений NFE. Фархадия [14] предложил усовершенствованную функцию оценки, учитывающую весовые коэффициенты позиций возможных значений. В последующем исследовании Фархадия [18] представил серию функций оценки, включающую функцию оценки на основе геометрического среднего и функцию минимальной (максимальной) оценки. Ван с соавторами [19] ввели понятие степени отклонения между элементами КНМ, на основе которого была разработана новая функция оценки, учитывающая степень отклонения.

Операторы агрегирования и методы принятия решений выступают в качестве важных инструментов для получения результатов на основе имеющейся информации для принятия решений. Тем не менее следует отметить их ограниченную функциональность: данные инструменты способны эффективно решать лишь стандартные задачи группового принятия решений. При этом они не обладают достаточной компетентностью для работы с задачами крупномасштабного группового принятия, где задействовано более 20 лиц, принимающих решения.

Несмотря на то, что было предложено множество подходов к решению задач группового принятия решений (ГПР) на В-КНМ, все они по своей природе исходят из предположения, что эксперты способны предоставить полную оценочную информацию по альтернативам. Однако в реальных условиях из-за временных ограничений, различий в образовательном уровне или ограниченности знаний, эксперты в масштабных проектах, включающих большое число ЛПР, не могут предоставить полную оценку при решении задач принятия решений.

В связи с этим для устранения проблемы неполной оценки было разработано несколько методов оценивания, применимых к лингвистическим отношениям предпочтений [20], нечётким отношениям предпочтений [21] и лингвистическим контекстам распределения [22]. Все эти методы опираются на известную оценочную информацию, предоставленную авторитетными экспертами, при этом индивидуальные уровни принятия решений экспертов игнорируются. Более того, данные подходы оперируют оценочной информацией, представленной в виде лингвистических множеств, колеблющихся нечетких лингвистических множеств и нечетких множеств предпочтений. Тем не менее, методы оценки, эффективно работающие с КПРБЭГ с учетом В-КНМ, требуют дальнейшего детального рассмотрения и обсуждения.

В процессе КПРБЭГ эксперты не всегда выступают как независимые участники, а доверительные отношения между ними могут существенно влиять на процесс принятия решений. Иными словами, эксперты часто опираются на мнения своих коллег, к которым они прислушиваются, или людей со схожими интересами при принятии решений. Следовательно, доверительные связи между экспертами потенциально могут оказывать влияние на процессы кластеризации, достижения консенсуса и сбора мнений. Предыдущие исследования выявили несколько ключевых функций доверительных отношений в процессе принятия решений: взвешивание экспертных мнений на основе степени доверия [23], нахождение лидеров среди экспертов и содействие эволюции мнений [24], а также формирование корректирующих предложений [25]. Например, Чу и др. [26] предложили подход к анализу сообществ в социальных сетях для повышения эффективности решения задач КПРБЭГ. Тiан и др. [27] разработали методологию анализа социальных сетей для устранения конфликтов в КПРБЭГ при работе с неполной нечеткой информацией второго типа.

В области социальных сетей было разработано множество теорий, включая распространение доверия [28], кластеризацию на основе доверия [29], обнаружение и устранение конфликтов доверия [30]. В качестве примера можно привести работу Лиу и др. [30], где было введено понятие распространения доверия на основе силы отношений и рассмотрена задача КПРБЭГ в социальных сетях с использованием интуиционистских нечетких множеств.

Все исследования в области социальных сетей подтверждают необходимость учета доверительных отношений в задачах КПРБЭГ. Однако многие существующие исследования КПРБЭГ игнорируют доверительные связи между экспертами, что приводит к относительно небольшому количеству работ, рассматривающих данную ситуацию.

Процесс достижения консенсуса (ДК) направлен на устранение конфликтов между экспертами и достижение коллективного решения, максимально приближенного к единогласному решению. На сегодняшний день в области группового принятия решений исследованы различные процессы достижения консенсуса, включая ДК на основе управления согласованностью, ДК в социальных сетях, модель консенсуса с минимальными затратами.

Лиу и др. [31] разработали эффективную структуру управления согласованностью и консенсусом для решения достижения согласия. Лиу и др. [25] учли уверенность экспертов в своих оценках при принятии решений в социальных сетях и предложили механизм обратной связи, основанный на динамических весах и доверии в модели консенсуса.

На основе робастной оптимизации Лю и др. [32] построили модель минимальных затрат для решения проблемы неопределенных затрат. Исследования упомянутых выше моделей консенсуса расширили область применения ГПР. Однако в задачах КПРБЭГ с В-КНМ процессы достижения консенсуса не рассматриваются, что по-прежнему создает значительные ограничения в практических ситуациях.

Целью данной работы является разработка алгоритма достижения консенсуса, который учитывает доверительные отношения в рамках КПРБЭГ с учетом В-КНМ. На основе метода интерпретационного структурного моделирования (ИСМ) представлен процесс кластеризации экспертов для повышения эффективности достижения консенсуса в КПРБЭГ. Данный метод опирается исключительно на социальные доверительные отношения экспертов при проведении кластеризации, что обеспечивает объективность и обоснованность результатов кластеризации.

Представлены операторы распространения доверия и агрегирования, подходящие для В-КНМ. Для достижения процесса представлены методы определения весов как для экспертов, так и для подмножеств.

Нечёткие колеблющиеся вероятностные колеблющиеся множества. Колеблющиеся нечеткие множества как расширение нечетких множеств были введены в работе [10]. Вместо одной традиционной функции принадлежности колеблющиеся нечеткие множества обрабатывают возможные значения функций принадлежности, представленные экспертами, из-за сомнений, неуверенности экспертов, несогласованности в оценках в случае участия группы экспертов или различных экспертных организаций. Этот метод позволяет использовать множество возможных значений в задачах принятия многокритериальных решений, когда эксперты не могут согласовать общие степени принадлежности.

Определение 1. Пусть X – эталонное множество. Колеблющееся нечеткое множество (КНМ) на множестве X – это функция, которая при применении к X возвращает подмножество $[0, 1]$:

$$A = \{ \langle x, h_A(x) \rangle \mid x \in X \}. \quad (1)$$

В (1) $h_A(x)$ – набор некоторых значений из $[0, 1]$, обозначающих возможные степени принадлежности элемента $x \in X$ множеству A . Авторы Ху и Хиа [33] называют $h = h_A(x)$ колеблющимся нечетким элементом (КНЭ).

Определение 2. Пусть X – эталонное множество, тогда вероятностное колеблющееся нечеткое В-КНМ H на X – это функция, которая определяется как

$$H = \{ \langle x, h_x(p_x) \rangle \mid x \in X \},$$

где h_x и p_x – два множества, значения элементов которых лежат внутри интервала $[0, 1]$. h_x отражает возможные степени принадлежности элемента $x \in X$ множеству H ; p_x – возможные распределения для степени принадлежности h_x . $h_x(p_x)$ называется вероятностным колеблющимся нечетким элементом (В-КНЭ). Для удобства В-КНЭ $h_x(p_x)$ записывается в виде $h(p)$.

$$h(p) = \{ \gamma_l(p_l) \mid l = 1, 2, \dots, \#h \},$$

где степени принадлежности γ_l располагаются в возрастающем порядке $\gamma_1 < \gamma_2 < \dots < \gamma_{\#h}$. p_l – вероятность степени принадлежности γ_l , которая удовлетворяет условию $\sum_{l=1}^{\#h} p_l = 1$. $\#h$ – количество элементов $\gamma_l(p_l)$ в $h(p)$.

Степень принадлежности γ_l представляет собой степень нерешительности эксперта при выборе между несколькими возможными значениями и находится в диапазоне $[0, 1]$. Чем ближе степень принадлежности γ_l к 1, тем выше степень принадлежности x к X . Чем ближе степень принадлежности γ_l к 0, тем ниже степень принадлежности x к X . Функция В-КНЭ может не только выражать степень принадлежности, но и представлять распределение степеней принадлежности. Например, если эксперт оценивает эвакуационную альтернативу, и он на 20% уверен, что оценка альтернативы может быть 0,5, а затем на 60% уверен, что оценка может быть 0,7, то информация об оценке может быть представлена в виде: $\{0,5(0,2), 0,7(0,6)\}$.

Для ранжирования различных В-КНЭ предлагается следующая функция оценки:

Определение 3. Задан В-КНЭ $h(p) = \{ \gamma_l(p_l) \mid l = 1, 2, \dots, \#h \}$. Его оценка s определяется как $s(h(p)) = \sum_{l=1}^{\#h} \gamma_l p_l$.

Для двух В-КНЭ $h_1(p)$ и $h_2(p)$, $h_1(p)$ превосходит $h_2(p)$, если $s(h_1(p)) > s(h_2(p))$, что обозначается $h_1(p) > h_2(p)$. Если $s(h_1(p)) = s(h_2(p))$, необходимо использовать степень отклонения.

Определение 4. Задан В-КНЭ $h(p) = \{\gamma_l(p_l) \mid l = 1, 2, \dots, \#h\}$. Его степень отклонения d определяется как $d(h(p)) = \sum_{l=1}^{\#h} (\gamma_l - s(h(p)))^2 p_l$.

Следовательно, два В-КНЭ $h_1(p)$ и $h_2(p)$ могут быть ранжированы согласно следующим правилам:

- 1) Если $s(h_1(p)) > s(h_2(p))$, то $h_1(p) > h_2(p)$.
- 2) Если $s(h_1(p)) = s(h_2(p))$ и $d(h_1(p)) > d(h_2(p))$, то $h_1(p) < h_2(p)$.
- 3) Если $s(h_1(p)) = s(h_2(p))$ и $d(h_1(p)) < d(h_2(p))$, то $h_1(p) > h_2(p)$.
- 4) Если $s(h_1(p)) = s(h_2(p))$ и $d(h_1(p)) = d(h_2(p))$, то $h_1(p) \sim h_2(p)$, что означает, что $h_1(p)$ и $h_2(p)$ индифферентны.

В реальных задачах значения В-КНЭ обычно различаются, что усложняет вычисления. Для решения этой проблемы необходимо добавить значения к В-КНЭ с меньшим количеством значений, чтобы нормализовать его значение относительно других В-КНЭ. При этом В-КНЭ, к которому добавляются значения, должен сохранять свою исходную информацию без каких-либо изменений, поэтому предлагается метод нормализации для В-КНЭ.

Определение 5. Даны два различных В-КНЭ $h_1(p) = \{\gamma_{1_l}(p_{1_l}) \mid l = 1, 2, \dots, \#h_1\}$ и $h_2(p) = \{\gamma_{2_l}(p_{2_l}) \mid l = 1, 2, \dots, \#h_2\}$. При этом длина $h_1(p)$ больше, чем $h_2(p)$, т.е. $\#h_1 > \#h_2$. Для нормализации $h_2(p)$, элемент $\gamma_{2_\pi}(p_{2_\pi})$ ($\pi = \#h_2 + 1, \#h_2 + 2, \dots, \#h_1$) добавляется к $h_2(p)$, где $\gamma_{2_\pi} = \max \{\gamma_{2_l}\}$ и $p_{2_\pi} = 0, l = 1, 2, \dots, \#h_2, \pi = \#h_2 + 1, \#h_2 + 2, \dots, \#h_1$.

Анализ социальных сетей. Анализ социальных сетей направлен на изучение взаимоотношений между социальными субъектами – членами групп, предприятиями или государствами [21, 24]. Данный подход позволяет построить модель взаимосвязей между участниками группы. В социальной сети выделяют три элемента: множество экспертов, взаимосвязи между ними и социометрические данные, что представлено на рис. 1 и в табл. 1.

Таблица 1

Различные элементы в анализе социальных сетей

Социометрическое представление	Алгебраическое представление
$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{aligned} &e_1 Re_2, e_1 Re_3, e_1 Re_4 \\ &e_2 Re_3 \\ &e_5 Re_2, e_5 Re_3, e_5 Re_4 \\ &e_6 Re_3, e_6 Re_4 \end{aligned}$

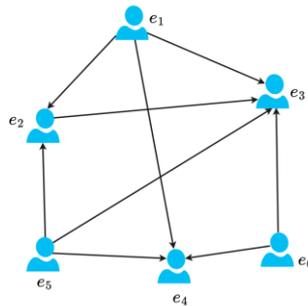


Рис. 1. Граф, соответствующий представлениям элементов в табл. 1

(1) Социометрическое представление формализует доверительные отношения между экспертами. В рамках этой модели $t_{ij} = 1$ означает, что эксперт e_i напрямую доверяет эксперту e_j . В противном случае значение t_{ij} равно 0, если нет доверительных отношений между экспертами e_i и e_j . Для множества экспертов в табл. 1 социометрическая матрица соответствует матрице смежности $AD = (ad)_{ij_{m \times m}}$.

(2) Алгебраическое представление. Это представление позволяет эксперту различать несколько различных отношений и представляет собой комбинацию отношений.

(3) Граф: социальная сеть представлена графом $G(V, E)$, где $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ – множество узлов, V – множество рёбер. $e_i \rightarrow e_j$ означает наличие прямых доверительных отношений между e_i и e_j .

Однако в традиционных методах анализа социальных сетей указанная выше социометрическая величина представляет собой только двоичное значение 0 или 1. Эти значения в социометрии могут быть измерены на основе реалистичных доверительных отношений между экспертами. В социометрии значение 0 означает, что нет прямых доверительных отношений между экспертами. Однако значение 1 означает, что один эксперт может напрямую доверять другому эксперту в социальной сети.

В социометрии значения 0 и 1 могут не подходить для описания неопределённости в доверительных отношениях между экспертами. Для решения этой проблемы дадим определение концепции вероятностной колеблющейся нечёткой социометрии, которая представлена ниже.

Определение 6. Вероятностная колеблющаяся нечёткая социометрия $T = (t_{ij})_{m \times m}$ на множестве E – это отношение $E \times E$ с $V_A E \times E \rightarrow [0, 1]$ и $v_A(e_i, e_j) = t_{ij}$, где t_{ij} – значение доверия, которое эксперт e_i присваивает эксперту e_j и которое задается как В-КНЭ.

Пример 1. Согласно определению 6 предположим, что доверительные отношения между семью экспертами представлены в форме ориентированного графа (см. табл. 1 и рис. 1). Соответствующая социометрическая матрица $T = (t_{ij})_{m \times m}$ представлена на рис. 2.

$$\begin{pmatrix} 0 & \{0,4(0,2), 0,3(0,5), 0,9(0,4)\} & \{0,3(0,5), 0,6(0,1), 0,7(0,3)\} & \{0,6(0,4), 0,2(0,4), 0,7(0,7)\} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \{0,7(0,4), 0,2(0,4), 0,8(0,6)\} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \{0,2(0,3), 0,7(0,1), 0,5(0,3)\} & \{0,5(0,2), 0,7(0,3), 0,4(0,2)\} & \{0,1(0,3), 0,5(0,5), 0,7(0,2)\} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \{0,2(0,3), 0,5(0,1), 0,7(0,4)\} & \{0,5(0,4), 0,9(0,2), 0,6(0,3)\} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рис. 2. Социометрическая матрица для графа на рис. 1

В рамках социометрического представления:

$t_{12} = \{0,4(0,2), 0,3(0,5), 0,9(0,4)\}$ означает, что значение доверия, присвоенное экспертом e_1 эксперту e_2 , равно $\{0,4(0,2), 0,3(0,5), 0,9(0,4)\}$;

$t_{31} = 0$ указывает на отсутствие прямого доверительного отношения от эксперта e_3 к эксперту e_1 .

В социальной сети некоторые эксперты могут не иметь информации о конкретном участнике, то есть не способны напрямую присвоить ему значение доверия. Однако возможно построить косвенное доверительное отношение, чтобы определить, можно ли доверять неизвестному эксперту.

В рамках социальной сети некоторые эксперты могут не обладать информацией о конкретном участнике, что означает невозможность прямого присвоения ему значения доверия. Однако можно сформировать косвенное доверительное отношение с целью определения степени доверия к неизвестному эксперту – посредством привлечения доверенных третьих лиц.

Как показано на рис. 3, прямое значение доверия от эксперта e_i к эксперту e_i отсутствует. Косвенное доверие может быть построено на основе свойства транзитивности доверия: эксперт e_i способен присвоить косвенное значение доверия эксперту e_j через доверенное третье лицо e_d .

Описанный подход, именуемый методом t-нормы, был предложен Виктором и соавторами [34]. Пусть $e_i \rightarrow e_d \rightarrow e_j$ – путь распространения доверия от эксперта e_i к эксперту e_j . В этом случае значение доверия t_{ij} может быть получено с использованием t-нормы.

$$t_{ij} = T(t_{id}, t_{dj}) = \frac{t_{id} t_{dj}}{1 + (1 - t_{id})(1 - t_{dj})},$$

где $t_{id}, t_{dj} \in [0, 1]$, t_{id} – уровень доверия от эксперта e_i к e_d , t_{dj} – уровень доверия от эксперта e_d к e_j .

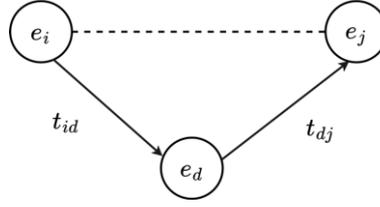


Рис. 3. Косвенное распространение доверия

В ряде случаев может существовать несколько путей передачи доверия от e_i к эксперту e_j , что проиллюстрировано на рис. 4. В частности, имеются два пути передачи доверия от эксперта e_i к эксперту e_j : $e_i \rightarrow e_{d1} \rightarrow e_j$ и $e_i \rightarrow e_{d2} \rightarrow e_j$.

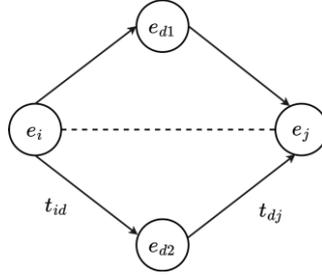


Рис. 4. Множественные пути распространения доверия

Чжан и соавторы [35] предложили оператор агрегирования доверия в социальной сети, основанный на применении оператора взвешенного усреднения (ОВУ). Данный оператор задаётся следующим образом.

Определение 7. Пусть $P^\beta: e_i \rightarrow \dots \rightarrow e_j$ ($\beta = 1, 2, \dots, u$) – множество u путей доверия от e_i к e_j и t_{ij}^β обозначает информацию о доверии от e_i к e_j через путь P^β .

Тогда агрегированное значение доверия от эксперта e_i к эксперту e_j определяется следующим образом:

$$t_{ij} = \text{ОВУ}(t_{ij}^1, t_{ij}^2, \dots, t_{ij}^u) = \sum_{\beta=1}^u \omega'_\beta t_{ij}^{\mu(\beta)},$$

где $t_{ij}^{\mu(\beta)}$ – β – ое наибольшее значение в $\{t_{ij}^1, t_{ij}^2, \dots, t_{ij}^u\}$, ω'_β – вес, такой что $\omega'_\beta \geq 0$ и $\sum_{\beta=1}^u \omega'_\beta = 1$.

Определение 8. Матрица достижимости $RE = (re_{ij})_{m \times m}$ графа $G(V, E)$ также является булевой матрицей. Значение re_{ij} равно 1, если вершина e_i может достичь e_j за конечное число шагов (по пути определённой длины), и 0 – в противном случае. Иными словами:

$$re_{ij} = \begin{cases} 1, & e_i \rightarrow e_j \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Матрица достижимости $RE = (re_{ij})_{m \times m}$ для множества из m экспертов может быть вычислена по формуле:

$$RE = (AD + I)^r,$$

где AD – матрица смежности графа доверия; I – единичная матрица того же порядка, что и AD ; r – показатель степени, определяемый условием:

$$AD + I \neq (AD + I)^2 \neq (AD + I)^3 \neq \dots \neq (AD + I)^{r-1} \neq (AD + I)^r = (AD + I)^{r+1}.$$

Значение $re_{ij} = 1$ означает, что эксперт e_i может достичь эксперта e_j через конечное число шагов распространения доверия (т. е. существует путь передачи доверия между ними).

Значение $re_{ij} = 0$ указывает на отсутствие какой-либо цепочки доверия между e_i и e_j .

Для экспертов, представленных в табл. 1, матрица достижимости RE отражает:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для экспертов в области группового принятия решений с учётом уровней доверия (LSGDM), опираясь на информацию об их доверительных связях, строится матрица смежности. Затем с помощью алгоритма Уоршелла [36] вычисляется матрица достижимости.

На основании матрицы достижимости RE определяется множество достижимости $RE(e_i)$ для эксперта e_i . Например, множество достижимости для эксперта e_2 имеет вид: $RE(e_2) = \{e_2, e_3\}$. Это означает, что эксперт e_2 может иметь прямые или косвенные доверительные связи с экспертами e_2, e_3 .

Определение 9 [37]. Множество antecedентов (предшествующих элементов) $AN(e_i)$ эксперта e_i – это множество таких экспертов, которые могут достичь эксперта e_i в матрице достижимости или в ориентированном графе.

Для эксперта e_2 (см. рис. 1) множество antecedентов $AN(e_2)$ составляет: $AN(e_2) = \{e_1, e_2, e_5\}$.

Определение 10 [37]. Множество общих элементов $CO(e_i)$ – это пересечение множества достижимости $RE(e_i)$ и множества antecedентов $AN(e_i)$ для эксперта e_i .

Для эксперта e_2 (см. рис. 1) множество общих элементов: $CO(e_2) = \{e_2\}$.

Определение 11 [37]. Множество начальных элементов $BE(E)$ – это множество экспертов, которые влияют на других участников, но при этом не подвержены влиянию со стороны иных элементов системы.

Для экспертов на рис. 1 множество начальных элементов $BE(E) = \{e_1, e_5, e_6\}$.

Кластеризация экспертов на основе ИСМ. В данном разделе представлен метод кластеризации на основе метода ИСМ и операторы распространения и агрегирования доверия в вероятностно-нечётких условиях с колебаниями (В-КНМ) для социальных сетей.

Ввиду сложности задач КПрБЭГ для повышения эффективности процесса согласования консенсуса ДК в социальных сетях часто применяется кластеризация экспертов. Основная идея кластеризации экспертов заключается в группировке участников с сопоставимым уровнем компетенций в отдельные подмножества. На сегодняшний день предложено множество методов кластеризации, включая: алгоритм серой кластеризации [38]; алгоритм K-means [39]; нечёткий алгоритм C-means [40].

Ключевой принцип этих методов заключается в том, что эксперты внутри одного подмножества должны обладать схожими характеристиками. Методы кластеризации широко применяются в различных областях, таких как электронная коммерция, классификация генов и распознавание объектов.

В контексте кластеризации экспертов метод ИСМ позволяет разделить сложную экспертную систему на несколько подмножеств; структурировать систему в многоуровневую иерархическую модель.

Поскольку метод ИСМ базируется преимущественно на доверительных связях между экспертами, результаты кластеризации обладают высокой наглядностью в задачах КПрБЭГ.

В алгоритме кластеризации используются следующие обозначения:

- ◆ $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ – конечное множество экспертов;
- ◆ $S = \{S_1, \dots, S_k, \dots, S_v\}$ – конечное множество подмножеств;
- ◆ $AD = (ad_{ij})_{m \times n}$ – матрица смежности для экспертов;
- ◆ $RE = (re_{ij})_{m \times m}$ – матрица достижимости для m экспертов;
- ◆ $RE(e_i)$ – множество достижимости эксперта e_i ;
- ◆ $AN(e_i)$ – предшествующее множество эксперта e_i ;
- ◆ $CO(e_i)$ – множество совпадений (пересечение) для эксперта e_i

Для повышения эффективности достижения консенсуса в задачах КПРБЭГ в ЧС на основе транспортировки потоков в нечётких условиях [41–43] в социальных сетях был разработан алгоритм выявления иерархической структуры экспертов – исключительно на основе информации об их доверительных связях.

Алгоритм кластеризации на основе ИСМ

Вход: Матрица смежности $AD = (ad_{ij})_{m \times n}$ m экспертов.

Выход: Подмножества $S_1, \dots, S_k, \dots, S_v$.

Шаг 1. Матрица смежности $AD = (ad_{ij})_{m \times n}$ находится согласно социальному графу $G(V, E)$.

Шаг 2. Найти матрицу достижимости экспертов.

Шаг 3. Эксперты $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ делятся на независимые подмножества. Сначала определяется множество $BE(E)$, затем два эксперта e_i и e_j произвольно выбираются из $BE(E)$. Если $RE(e_i) \cap RE(e_j) = \emptyset$, эксперт e_i и эксперты в $RE(e_i)$ принадлежат одному множеству, а e_j и эксперты в $RE(e_j)$ принадлежат другому множеству. Если $RE(e_i) \cap RE(e_j) \neq \emptyset$, все эксперты принадлежат одному классу.

Шаг 4. Иерархический уровень эксперта определяется для каждого множества. Для первого множества N_1 эксперт e_i находится на верхнем уровне иерархии, если $CO(e_i) = RE(e_i)$. После этого эксперт e_i удаляется из множества N_1 . Затем определяется новое множество N'_1 . Во множестве N'_1 эксперты снова ранжируются по уровням иерархии, начиная с высшего уровня.

Шаг 5. В соответствии с иерархическими уровнями экспертов строится многоуровневый иерархический ориентированный граф. На выходе получаются множества $S_1, \dots, S_k, \dots, S_v$.

Шаг 6. Конец.

Пример 2. Предположим, что $E = \{e_1, e_2 \dots e_6\}$ – это множество из 6 экспертов, их исходные отношения социального доверия представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Согласно социометрии, представленной в табл. 1, матрица смежности $AD = (ad_{ij})_{6 \times 6}$ 6 экспертов имеет вид:

$$AD = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

На основании равенства $AC = (AD + I)^r$ матрица достижимости $RE = (re_{ij})_{6 \times 6}$ для 6 экспертов может быть получена при $r = 2$.

$$RE = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

1). Согласно матрице достижимости $RE = (re_{ij})_{6 \times 6}$, множество начальных элементов $BE(E) = \{e_1, e_5, e_6\}$. Так как $RE(e_5) \cap RE(e_6) \neq \emptyset$, то $RE(e_5) \cap RE(e_6) = \{e_2, e_3, e_4, e_5\} \cap \{e_3, e_4, e_6\} = \{e_3, e_4\}$. Следовательно, эксперты e_2, e_3, e_4, e_5, e_6 принадлежат уровню иерархии N_1 , эксперт e_1 принадлежит уровню иерархии N_2 .

2). Определяем уровни иерархии для множества N_1 . Для $e_3: RE(e_3) = \{e_3\}$ $AN(e_3) = \{e_2, e_3, e_5, e_6\}$, $COE(e_3) = \{e_3\}$. Удаляем данную вершину из множества. Следовательно, эксперт e_3 находится на верхнем уровне иерархии.

Для $e_4: RE(e_4) = \{e_4\}$, $AN(e_4) = \{e_4, e_5, e_6\}$, $COE(e_4) = \{e_4\}$. Удаляем данную вершину из множества.

Следовательно, вершины e_3 и e_4 находятся на верхнем уровне иерархии.

3) Рассмотрим иерархию вершин $\{e_2, e_5, e_6\}$. Для $e_2: RE(e_2) = \{e_2\}$, $AN(e_2) = \{e_2, e_5\}$, $COE(e_2) = \{e_2\}$.

Для $e_5: RE(e_5) = \{e_2, e_5\}$, $AN(e_5) = \{e_5\}$, $COE(e_2) = \{e_2\}$.

Для $e_6: RE(e_6) = \{e_6\}$, $AN(e_6) = \{e_6\}$, $COE(e_6) = \{e_6\}$.

Следовательно, вершины e_2 и e_6 находятся на втором уровне иерархии. Вершина e_5 расположена на третьем уровне. Иерархическая структура представлена на рис. 5.

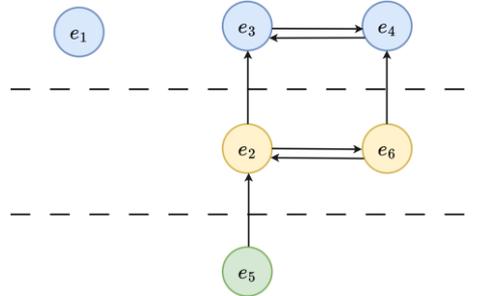


Рис. 5. Иерархическая структура для примера 2

Операторы распространения и агрегирования доверия для вероятностно-нечёткой колеблющейся информации. На основе t -нормы предложен оператор распространения доверия для вероятностно-нечётких элементов (В-КНЭ), предназначенный для передачи значений доверия в формате В-КНЭ между экспертами.

Определение 12. Пусть $e_i \rightarrow e_{\sigma(1)} \rightarrow e_{\sigma(2)} \rightarrow \dots \rightarrow e_{\sigma(f)} \rightarrow e_j$ – путь распространения доверия от e_i к e_j . Полагаем, что $t_{i\sigma(1)} = \{\gamma_{i\sigma(1)l}(p_{i\sigma(1)l}) \mid l = 1, 2, \dots, \#h\}$, $t_{\sigma(1)\sigma(2)} = \{\gamma_{\sigma(1)\sigma(2)l}(p_{\sigma(1)\sigma(2)l}) \mid l = 1, 2, \dots, \#h\}, \dots, t_{\sigma(f)j} = \{\gamma_{\sigma(f)jl}(p_{\sigma(f)jl}) \mid l = 1, 2, \dots, \#h\}$ – набор нормализованных В-КНЭ которые выражают значения доверия. Если распространение доверия от e_i к e_j – это $e_i \rightarrow e_{\sigma(1)} \rightarrow e_j$, то оператор распространения доверия В-ОРД определяется как

$$\begin{aligned}
 & \text{В - ОРД } (t_{\sigma(1)j}) = \\
 & \left\{ \frac{\gamma_{i\sigma(1)1}\gamma_{i\sigma(1)j_1}}{1+(1-\gamma_{i\sigma(1)1})(1-\gamma_{\sigma(1)j_1})} \times \left(\frac{p_{i\sigma(1)1}p_{\sigma(1)j_1}}{1+(1-p_{i\sigma(1)1})(1-p_{\sigma(1)j_1})} \right), \frac{\gamma_{i\sigma(1)2}\gamma_{i\sigma(1)j_2}}{1+(1-\gamma_{i\sigma(1)2})(1-\gamma_{\sigma(1)j_2})} \times \right. \\
 & \left. \left(\frac{p_{i\sigma(1)2}p_{\sigma(1)j_2}}{1+(1-p_{i\sigma(1)2})(1-p_{\sigma(1)j_2})} \right), \dots, \frac{\gamma_{i\sigma(1)\#h}\gamma_{i\sigma(1)j_{\#h}}}{1+(1-\gamma_{i\sigma(1)\#h})(1-\gamma_{\sigma(1)j_{\#h}})} \times \left(\frac{p_{i\sigma(1)\#h}p_{\sigma(1)j_{\#h}}}{1+(1-p_{i\sigma(1)\#h})(1-p_{\sigma(1)j_{\#h}})} \right) \right\}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

Пример 3. Пусть $t_{i\sigma(1)} = \{0,5(0,6), 0,3(0,2), 0,7(0,3)\}$ и $t_{i\sigma(1)j} = \{0,7(0,4), 0,4(0,6), 0,8(0,5)\}$. Тогда на основе (2) доверительное значение t_{ij} от эксперта e_i к e_j определяется как $\text{В - ОРД } (t_{i\sigma(1)}, t_{\sigma(1)j}) = \left\{ \frac{0,5 \times 0,7}{1+(1-0,5)(1-0,7)} \times \left(\frac{0,6 \times 0,4}{1+(1-0,6)(1-0,4)} \right), \frac{0,3 \times 0,4}{1+(1-0,3)(1-0,4)} \times \left(\frac{0,2 \times 0,6}{1+(1-0,2)(1-0,6)} \right), \frac{0,7 \times 0,8}{1+(1-0,7)(1-0,8)} \times \left(\frac{0,3 \times 0,5}{1+(1-0,3)(1-0,5)} \right) \right\} = \{0,30(0,19), 0,08(0,09), 0,53(0,11)\}$.

Могут существовать различные пути распространения доверия среди экспертов в социальных графах. Оператор агрегирования доверия был использован для получения коллективной доверительной информации из различных путей. Оператор упорядоченного взвешенного усреднения используется для агрегирования В-КНЭ доверительной информации из различных путей.

Определение 13. Пусть $P^\beta: e_i \rightarrow \dots \rightarrow e_j$ ($\beta = 1, 2, \dots, u$) является множеством u доверительных путей от e_i к e_j и $t_{ij}^\beta = \{\gamma_{ijl}^\beta(p_{ijl}^\beta) \mid l = 1, 2, \dots, \#h\}$ определяет доверительную информацию от e_i к e_j через путь P^β . В-КНЭ оператор агрегирования доверия (В-ОАД) задается как

$$\begin{aligned}
 B - \text{ОАД}(t_{ij}^1, t_{ij}^2, \dots, t_{ij}^u) &= \sum_{\beta=1}^u \omega'_\beta t_{ij}^{\mu(\beta)} \\
 &= \left\{ \begin{array}{l} \sum_{\beta=1}^u \omega'_\beta t_{ij_1}^{\mu(\beta)} \left(\sum_{\beta=1}^u \omega'_\beta p_{ij_1}^{\mu(\beta)} \right), \sum_{\beta=1}^u \omega'_\beta t_{ij_2}^{\mu(\beta)} \left(\sum_{\beta=1}^u \omega'_\beta p_{ij_2}^{\mu(\beta)} \right), \dots, \\ \sum_{\beta=1}^u \omega'_\beta t_{ij_{\#h}}^{\mu(\beta)} \left(\sum_{\beta=1}^u \omega'_\beta p_{ij_{\#h}}^{\mu(\beta)} \right) \end{array} \right\}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где $t_{ij}^{\mu(\beta)}$ – наибольшее β -ое значение из множества $\{t_{ij}^1, t_{ij}^2, \dots, t_{ij}^u\}$ и ω'_β – вес, такой что $\omega'_\beta \geq 0$ и $\sum_{\beta=1}^u \omega'_\beta = 1$. Вес ω'_β может быть вычислен согласно подходу, ориентированному на нечёткие квантификаторы, с опорой на пропорциональный нечёткий квантификатор в рамках нечёткой логики Q .

$$\omega'_\beta = Q\left(\frac{\beta}{u}\right) - Q\left(\frac{\beta-1}{u}\right), \quad (\beta = 1, 2, \dots, u), \quad (4)$$

$$\text{где } Q(a) = \begin{cases} 0, & a < b \\ \frac{a-b}{g-b}, & b \leq a \leq g \\ 1, & a > g, \end{cases}$$

$g, a, b \in [0, 1]$. (g, b) параметры, которые представляют квантификаторы «Все», «Большинство», «По крайней мере половина» и «Наибольшее возможное число». Как правило, значения для (g, b) – это $(0, 1)$, $(0, 3)$, $(0, 8)$, $(0, 0, 5)$ и $(0, 5, 1)$.

Пример 4. Предположим существуют три доверительных пути от эксперта e_1 к эксперту e_3 после удаления доверительных путей длиной более 2. Данные пути: $P^1: e_2 \rightarrow e_8 \rightarrow e_4$, $P^2: e_2 \rightarrow e_{10} \rightarrow e_4$, $P^3: e_2 \rightarrow e_{12} \rightarrow e_4$. Доверительные значения в каждом доверительном пути представляют собой $t_{24}^1 = \{0,32(0,15), 0,40(0,08), 0,58(0,03)\}$, $t_{24}^2 = \{0,10(0,18), 0,41(0,06), 0,55(0,09)\}$, $t_{24}^3 = \{0,13(0,07), 0,19(0,16), 0,22(0,18)\}$ и могут быть агрегированы с помощью В-ОАД. Вес ω'_β В-ОАД в может быть вычислен согласно подходу, ориентированному на нечёткие квантификаторы. Вес ω'_β : $\omega'_1 = 0,053$, $\omega'_2 = 0,697$, $\omega'_3 = 0,250$.

Общее доверительное значение может быть вычислено как $t_{24} = B - \text{ОАД}(t_{24}^1, t_{24}^2, t_{24}^3) = \{0,119(0,151), 0,354(0,086), 0,469(0,109)\}$.

Таким образом, на основе разработанного алгоритма становится возможным принимать решения в ЧС в сложных условиях, когда имеется более 20 экспертов, на основе достижения консенсуса в социальных сетях с неполной вероятностной нечёткой информацией. На первом этапе алгоритма осуществляется кластеризация экспертов на основе интерпретационного структурного моделирования для классификации экспертов, а также для повышения эффективности достижения консенсуса. На втором этапе осуществляется косвенное отношение доверия между экспертами для определения весов экспертов. На следующем этапе будет достигнут консенсус с учетом колеблющейся вероятностной нечеткой информации и определена наилучшая эвакуационная альтернатива.

Заключение. В данной статье рассматривается проблема крупномасштабного группового принятия решений с учётом социального сетевого контекста при неполной вероятностной нечёткой информации с элементами неуверенности. Предлагаются также подходы к управлению процессом достижения консенсуса.

В рамках предложенной методологии к принятию решений большими группами экспертов был разработан метод кластеризации на основе интерпретационного структурного моделирования, позволяющий снизить сложность обработки данных при работе с большим числом экспертов, связанных отношениями доверия. Предложены операторы распространения и агрегирования доверия для вероятностной нечёткой информации с элементами неуверенности, которые позволяют оценивать уровень доверия между экспертами, не имеющими прямых связей. В результате удаётся сформировать несколько

подмножеств экспертов; определить весовые коэффициенты для большого числа экспертов на основе их взаимных отношений доверия. На основе кластеризации экспертов и вычисленного косвенного отношения доверия между экспертами осуществляется принятие решений в ЧС за счет достижения консенсуса с учетом колеблющейся вероятностной нечеткой информации и определяется наилучшая эвакуационная альтернатива.

В настоящее время наше исследование можно развить в нескольких перспективных направлениях. Во-первых, интеграция мнения пользователей относительно реакции на ЧС, полученных из онлайн-социальных платформ, в предложенную методологию для решения задачи крупномасштабного группового принятия решений с учетом социального сетевого контекста при ЧС. Во-вторых, исследование процесса достижения консенсуса при крупномасштабном групповом принятии решений в условиях динамических социальных сетей. В-третьих, разработка алгоритма, который проверяет индивидуальный уровень принятия решений экспертов и позволяет оценить пропущенные значения в неполных вероятностных нечетких матрицах решений с элементами неуверенности.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет принимать эффективные решения большими группами экспертов в условиях неполноты информации, сомнений и неуверенности экспертов за счет достижения консенсуса и учета мнений меньшинства.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-10121-П, <https://rscf.ru/project/22-71-10121-П/в-Южном-федеральном-университете>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Liu X., Xu Y.J., Herrera F. Consensus model for large-scale group decision making based on fuzzy preference relation with self-confidence: Detecting and managing overconfidence behaviors // *Inf. Fusion*. – 2019. – Vol. 52. – P. 245-256.
2. Li S.L., Wei C.P. A large-scale group decision making approach in healthcare service based on subgroup weighting model and hesitant fuzzy linguistic information // *Computers & Industrial Engineering*. – 2020. – Vol. 144.
3. Wu Z.B., Xu J.P. A consensus model for large-scale group decision making with hesitant fuzzy information and changeable clusters // *Information Fusion*. – 2018. – Vol. 41. – P. 217-231.
4. Lu Y.L., Xu Y.J., Huang J., Wei J., Herrera-Viedma E. Social network clustering and consensus-based distrust behaviors management for large-scale group decision-making with incomplete hesitant fuzzy preference relations // *Applied Soft Computing*. – 2022. – Vol. 117.
5. Rodríguez R.M., Labella A., Sesma-Sara M., Bustince H., Martínez L. A cohesion-driven consensus reaching process for large scale group decision making under a hesitant fuzzy linguistic term sets environment // *Computers & Industrial Engineering*. – 2021. – Vol. 155.
6. Gai T., Cao M., Chiclana F., Zhang Z., Dong Y., Herrera-Viedma E., Wu J. Consensus-trust driven bidirectional feedback mechanism for improving consensus in social network large-group decision making // *Group Decision and Negotiation*. – 2023. – Vol. 32 (1). – P. 45-74.
7. Zhao M.K., Guo J., Wu J., Xu Z.S. A global optimization feedback model with PSO for large scale group decision making in hesitant fuzzy linguistic environments // *Expert Systems with Applications*. – 2023. – Vol. 228.
8. Ji F., Wu J., Chiclana F., Wang S., Fujita H., Herrera-Viedma E. The overlapping community driven feedback mechanism to support consensus in social network group decision making // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2023. – P. 1-15.
9. Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Information and Control*. – 1965. – Vol. 8(3). – P. 338-353.
10. Torra V. Hesitant fuzzy sets // *International Journal of Intelligent Systems*. – 2010. – Vol. 25 (6). – P. 529-539.
11. Yang H., Wang G.X.F., Zhang Y. A clustering-based method for large-scale group decision making in the hesitant fuzzy set environment // *Computers & Industrial Engineering*. – 2023. – Vol. 183.
12. Zhu B. Decision Method for Research and Application Based on Preference Relation. – Southeast University, Nanjing. – 2014.
13. Zhang Z.M., Wu C. Weighted hesitant fuzzy sets and their application to multi-criteria decision making // *Br. J. Math. Comput. Sci.* – 2014. – Vol. 4. – P. 1091-1123.
14. Farhadinia, B. A novel method of ranking hesitant fuzzy values for multiple attribute decision-making problems // *International Journal of Intelligent Systems*. – 2013. – Vol. 28 (8). – P. 752-767.
15. Kamaci H., Petchimuthu S., Akcetin E. Dynamic aggregation operators and Einstein operations based on interval-valued picture hesitant fuzzy information and their applications in multi-period decision making // *Computational and Applied Mathematics*. – 2021. – Vol. 40 (4).

16. Yang W., Wang C.J., Liu Y., Sun Y. Hesitant Pythagorean fuzzy interaction aggregation operators and their application in multiple attribute decision-making // *Complex & Intelligent Systems*. – 2019. – Vol. 5 (2). – P. 199-216.
17. Xia M. M., Xu, Z.S. Hesitant fuzzy information aggregation in decision making // *International Journal of Approximate Reasoning*. – 2011. – Vol. 52(3). – P. 395-407.
18. Farhadinia B. A series of score functions for hesitant fuzzy sets // *Information Sciences*. – 2014. – Vol. 277. – P. 102-110.
19. Wang B. L., Liang J.Y., Pang, J.F. Deviation degree: A perspective on score functions in hesitant fuzzy sets // *International Journal of Fuzzy Systems*. – 2019. – Vol. 21(7). – P. 2299-2317.
20. Zhang X.Y., Zhang H.Y., Wang J.Q. Discussing incomplete 2-tuple fuzzy linguistic preference relations in multi-granular linguistic MCGDM with unknown weight information // *Soft Comput*. 2019. – Vol. 2. – P. 2015-2032.
21. Liang Q., Liao X.W., Liu J.P. A social ties-based approach for group decision-making problems with incomplete additive preference relations // *Knowl.-Based Syst*. – 2017. – Vol. 119. – P. 68-86.
22. Zhang B.W., Liang H.M., Gao Y. et al. The optimization-based aggregation and consensus with minimum-cost in group decision making under incomplete linguistic distribution context // *Knowl.-Based Syst*. – 2018. – Vol.162. – P. 92-102.
23. Wu J., Chiclana F., Fujita H. et al. A visual interaction consensus model for social network group decision making with trust propagation // *Knowl.-Based Syst*. – 2017. – Vol. 122. – P. 39-50.
24. Dong Y.C., Ding Z.G., Martinez L. et al. Managing consensus based on leadership in opinion dynamics // *Inform. Sci*. – 2017. – Vol. 397. – P. 187-205.
25. Liu X., Xu Y.J., Montes R. et al. Social network group decision making: Managing self-confidence-based consensus model with the dynamic importance degree of experts and trust-based feedback mechanism, // *Inform. Sci*. – 2019. – Vol. 505. – P. 215-232.
26. Chu J.F., Wang Y.M., Liu X.W. et al. Social network community analysis based large-scale group decision making approach with incomplete fuzzy preference relations // *Inf. Fusion*. – 2020. –Vol. 60. – P. 98-120.
27. Tian Z.P., Nie R.X., Wan J.Q. Social network analysis-based consensus- supporting framework for large-scale group decision-making with incomplete interval type-2 fuzzy information // *Inform. Sci*. – 2019. Vol. 5. – P. 446-471.
28. Wu J., Xiong R.Y., Chiclana F. Uninorm trust propagation and aggregation methods for group decision making in social network with four tuple information // *Knowl.-Based Syst*. – 2016. – Vol. 96. – P. 29-39.
29. Z.J., Luo H.Y., Lin X.D. et al. A trust-similarity analysis-based clustering method for large-scale group decision-making under a social network // *Inf. Fusion*. –2020. – Vol. 63. – P. 13-29.
30. Liu B.S., Zhou Q., Ding R.X. et al. Large-scale group decision making model based on social network analysis: trust relationship-based conflict detection and elimination // *European J. Oper. Res*. – 2019. – Vol. 502. – P. 446-471.
31. Liu N.N., He Y., Xu Z.S. A new approach to deal with consistency and consensus issues for hesitant fuzzy linguistic preference relations // *Appl. Soft Comput*. – 2019. – Vol. 76. – P. 400-415.
32. Lu Y.L., Xu Y.J., Herrera-Viedma E. et al. Consensus of large-scale group decision making in social network: the minimum cost model based on robust optimization // *Inform. Sci*. – 2021. – Vol. 547. – P. 910-930.
33. Xu Z. Hesitant Fuzzy Sets Theory // *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. – 2014. – Vol. 314.
34. Victor P. Cornelis C., Cock M.D. et al. Practical aggregation operators for gradual trust and distrust // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2011. – Vol. 184. – P. 126-147.
35. Zhang H.J., Palomares I., Dong Y.C. et al. Managing non-cooperative behaviors in consensus-based multiple attribute group decision making: An approach based on social network analysis // *Knowl.-Based Syst*. – 2018. – Vol. 162. – P. 29-45.
36. Warshall S. A theorem on boolean matrices // *J. ACM*. – 1962. – Vol. 9. – P. 11-12.
37. Wang Y.L. *Systems Engineering*. – China Machine Press. – 2020.
38. Liu S.F., Lin Y. *Grey Systems: Theory and Applications*. – Springer Science & Business Media. – 2010.
39. Wu Z.B. Xu J.P. A consensus model for large-scale group decision making with hesitant fuzzy information and changeable clusters // *Inf. Fusion*. – 2018. – Vol. 41. – P. 217-231.
40. Bezdek J.C., Ehrlich R., Full W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm // *Comput. Geosci*. – 1984. – Vol. 10. – P. 191-203.
41. Герасименко Е.М., Кравченко Д.Ю., Курейчик В.В., Кулиев Э.В., Кравченко Ю.А., Ю.А., Родзин С.И. Модифицированный биоинспирированный метод поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций // *Информационные технологии*. – 2023. – Т. 29, № 8. – С. 423-436.

42. Kacprzyk J., Bozhenyuk A., Gerasimenko E. Lexicographic maximum dynamic evacuation modeling with partial lane reversal based on hesitant fuzzy TOPSIS [Formula presented] // *Applied Soft Computing*. – 2023. – Vol. 144.
43. Курейчик В.В., Герасименко Е.М. Интегрированный алгоритм многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации // *Информатика и автоматизация*. – 2025. – Т. 24. – No. 5. – С. 1284-1332.

REFERENCES

1. Liu X., Xu Y.J., Herrera F. Consensus model for large-scale group decision making based on fuzzy preference relation with self-confidence: Detecting and managing overconfidence behaviors, *Inf. Fusion*, 2019, Vol. 52, pp. 245-256.
2. Li S.L., Wei C.P. A large-scale group decision making approach in healthcare service based on subgroup weighting model and hesitant fuzzy linguistic information, *Computers & Industrial Engineering*, 2020, Vol. 144.
3. Wu Z.B., Xu J.P. A consensus model for large-scale group decision making with hesitant fuzzy information and changeable clusters, *Information Fusion*, 2018, Vol. 41, pp. 217-231.
4. Lu Y.L., Xu Y.J., Huang J., Wei J., Herrera-Viedma E. Social network clustering and consensus-based distrust behaviors management for large-scale group decision-making with incomplete hesitant fuzzy preference relations, *Applied Soft Computing*, 2022, Vol. 117.
5. Rodríguez R.M., Labella A., Sesma-Sara M., Bustince H., Martínez L. A cohesion-driven consensus reaching process for large scale group decision making under a hesitant fuzzy linguistic term sets environment, *Computers & Industrial Engineering*, 2021, Vol. 155.
6. Gai T., Cao M., Chiclana F., Zhang Z., Dong Y., Herrera-Viedma E., Wu J. Consensus-trust driven bidirectional feedback mechanism for improving consensus in social network large-group decision making, *Group Decision and Negotiation*, 2023, vol. 32(1), pp. 45–74.
7. Zhao M.K., Guo J., Wu J., Xu Z.S. A global optimization feedback model with PSO for large scale group decision making in hesitant fuzzy linguistic environments, *Expert Systems with Applications*, 2023, Vol. 228.
8. Ji F., Wu J., Chiclana F., Wang S., Fujita H., Herrera-Viedma E. The overlapping community driven feedback mechanism to support consensus in social network group decision making, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2023, pp. 1-15.
9. Zadeh L.A. Fuzzy sets, *Information and Control*, 1965, Vol. 8 (3), pp. 338-353.
10. Torra V. Hesitant fuzzy sets, *International Journal of Intelligent Systems*, 2010, Vol. 25 (6), pp. 529-539.
11. Yang H., Wang G.X.F., Zhang Y. A clustering-based method for large-scale group decision making in the hesitant fuzzy set environment, *Computers & Industrial Engineering*, 2023, Vol. 183.
12. Zhu B. Decision Method for Research and Application Based on Preference Relation. Southeast University, Nanjing, 2014.
13. Zhang Z.M., Wu C. Weighted hesitant fuzzy sets and their application to multi-criteria decision making, *Br. J. Math. Comput. Sci.*, 2014, Vol. 4, pp. 1091-1123.
14. Farhadinia, B. A novel method of ranking hesitant fuzzy values for multiple attribute decision-making problems, *International Journal of Intelligent Systems*, 2013, Vol. 28 (8), pp. 752-767.
15. Kamaci H., Petchimuthu S., Akcetin E. Dynamic aggregation operators and Einstein operations based on interval-valued picture hesitant fuzzy information and their applications in multi-period decision making, *Computational and Applied Mathematics*, 2021, Vol. 40 (4).
16. Yang W., Wang C.J., Liu Y., Sun Y. Hesitant Pythagorean fuzzy interaction aggregation operators and their application in multiple attribute decision-making, *Complex & Intelligent Systems*, 2019, Vol. 5 (2), pp. 199-216.
17. Xia M.M., Xu, Z.S. Hesitant fuzzy information aggregation in decision making, *International Journal of Approximate Reasoning*, 2011, Vol. 52 (3), pp. 395-407.
18. Farhadinia B. A series of score functions for hesitant fuzzy sets, *Information Sciences*, 2014, vol. 277, pp. 102-110.
19. Wang B. L., Liang J. Y., Pang, J. F. Deviation degree: A perspective on score functions in hesitant fuzzy sets, *International Journal of Fuzzy Systems*, 2019, Vol. 21 (7), pp. 2299-2317.
20. Zhang X.Y., Zhang H.Y., Wang J.Q. Discussing incomplete 2-tuple fuzzy linguistic preference relations in multi-granular linguistic MCGDM with unknown weight information, *Soft Comput.*, 2019, Vol. 2, pp. 2015-2032.
21. Liang Q., Liao X.W., Liu J.P. A social ties-based approach for group decision-making problems with incomplete additive preference relations, *Knowl.-Based Syst.*, 2017, Vol. 119, pp. 68-86.
22. Zhang B.W., Liang H.M., Gao Y. et al. The optimization-based aggregation and consensus with minimum-cost in group decision making under incomplete linguistic distribution context, *Knowl.-Based Syst.*, 2018, Vol. 162, pp. 92-102.

23. Wu J., Chiclana F., Fujita H. et al. A visual interaction consensus model for social network group decision making with trust propagation, *Knowl.-Based Syst.*, 2017, Vol. 122, pp. 39-50.
24. Dong Y.C., Ding Z.G., Martínez L. et al. Managing consensus based on leadership in opinion dynamics, *Inform. Sci.*, 2017, Vol. 397, pp. 187-205.
25. Liu X., Xu Y.J., Montes R. et al. Social network group decision making: Managing self-confidence-based consensus model with the dynamic importance degree of experts and trust-based feedback mechanism, *Inform. Sci.*, 2019, Vol. 505, pp. 215-232.
26. Chu J.F., Wang Y.M., Liu X.W. et al. Social network community analysis based large-scale group decision making approach with incomplete fuzzy preference relations, *Inf. Fusion*, 2020, Vol. 60, pp. 98-120.
27. Tian Z.P., Nie R.X., Wan J.Q. Social network analysis-based consensus-supporting framework for large-scale group decision-making with incomplete interval type-2 fuzzy information, *Inform. Sci.*, 2019, Vol. 5, pp. 446-471.
28. Wu J., Xiong R.Y., Chiclana F. Uninorm trust propagation and aggregation methods for group decision making in social network with four tuple information, *Knowl.-Based Syst.*, 2016, Vol. 96, pp. 29-39.
29. Du Z.J., Luo H.Y., Lin X.D. et al. A trust-similarity analysis-based clustering method for large-scale group decision-making under a social network, *Inf. Fusion*, 2020, Vol. 63, pp. 13-29.
30. Liu B.S., Zhou Q., Ding R.X. et al. Large-scale group decision making model based on social network analysis: trust relationship-based conflict detection and elimination, *European J. Oper. Res.*, 2019, Vol. 502, pp. 446-471.
31. Liu N.N., He Y., Xu Z.S. A new approach to deal with consistency and consensus issues for hesitant fuzzy linguistic preference relations, *Appl. Soft Comput.*, 2019, Vol. 76, pp. 400-415.
32. Lu Y.L., Xu Y.J., Herrera-Viedma E. et al. Consensus of large-scale group decision making in social network: the minimum cost model based on robust optimization, *Inform. Sci.*, 2021, Vol. 547, pp. 910-930.
33. Xu Z. Hesitant Fuzzy Sets Theory, *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 2014, Vol. 314.
34. Victor P. Cornelis C., Cock M.D. et al. Practical aggregation operators for gradual trust and distrust, *Fuzzy Sets and Systems*, 2011, Vol. 184, pp. 126-147.
35. Zhang H.J., Palomares I., Dong Y.C. et al. Managing non-cooperative behaviors in consensus-based multiple attribute group decision making: An approach based on social network analysis, *Knowl.-Based Syst.*, 2018, Vol. 162, pp. 29-45.
36. Warshall S. A theorem on boolean matrices, *J. ACM*, 1962, Vol. 9, pp. 11-12.
37. Wang Y.L. Systems Engineering. China Machine Press, 2020.
38. Liu S.F., Lin Y. Grey Systems: Theory and Applications. Springer Science & Business Media, 2010.
39. Wu Z.B. Xu J.P. A consensus model for large-scale group decision making with hesitant fuzzy information and changeable clusters, *Inf. Fusion*, 2018, Vol. 41, pp. 217-231.
40. Bezdek J.C., Ehrlich R., Full W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm, *Comput. Geosci*, 1984, Vol. 10, pp. 191-203.
41. Gerasimenko E.M., Kravchenko D.Yu., Kureichik V.V., Kuliev E.V., Kravchenko Yu.A., Rodzin S.I. Modifitsirovanny bioinspirirovanny metod podderzhki prinyatiya resheniy po preduprezhdeniyu i likvidatsii posledstviy chrezvychainykh situatsiy [A modified bio-inspired method for decision-support in prevention and response to emergency situations], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2023, Vol. 29, No. 8, pp. 423-436.
42. Kasprzyk J., Bozhenyuk A., Gerasimenko E. Lexicographic maximum dynamic evacuation modeling with partial lane reversal based on hesitant fuzzy TOPSIS [Formula presented], *Applied Soft Computing*, 2023, Vol. 144.
43. Kureichik V.V., Gerasimenko E.M. Integrirovanny algoritm mnogokriterial'nogo gruppovogo prinyatiya resheniy dlya zadach evakuatsii [An integrated algorithm for multi-criteria group decision-making in evacuation planning], *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation], 2025, Vol. 24, No 5, pp. 1284-1332.

Герасименко Евгения Михайловна – Южный федеральный университет; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; доцент.

Герасименко Петр Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: pege@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; м.н.с.

Gerasimenko Evgeniya Michailovna – Southern Federal University; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; V.M. Kureichik Computer-Aided Design Systems Department; associate professor.

Gerasimenko Petr Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: pege@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; V.M. Kureichik Computer-Aided Design Systems Department; junior researcher.

О.М. Голозубов, А.В. Козловский, Э.В. Мельник, Я.Э. Мельник, А.Н. Самойлов

**ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ИНТЕРПОЛЯЦИИ
ДЕКАДНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО
ВЗВЕШИВАНИЯ ПО РАССТОЯНИЮ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКОЙ
МНОЖЕСТВЕННЫХ ВРЕМЕННЫХ СРЕЗОВ**

Настоящее исследование посвящено решению проблемы вычислительной неэффективности при пространственной интерполяции больших массивов декадных метеорологических данных с использованием метода обратного взвешивания по расстоянию. Традиционные подходы, предполагающие последовательную и независимую обработку каждого временного среза, демонстрируют линейный рост времени выполнения и значительное потребление оперативной памяти, что становится критическим барьером для оперативного построения детализированных и географически привязанных растровых полей в формате GeoTIFF. Это существенно ограничивает применение метода в задачах, требующих быстрой обработки многолетних архивов данных. Целью данной работы является разработка и валидация оптимизированной вычислительной схемы, позволяющей радикально сократить временные затраты при сохранении полноты и точности результатов. Ключевая научная новизна предложенного подхода заключается в фундаментальном переосмыслении вычислительного процесса. Вместо многократного повторения идентичных операций, предложена схема, основанная на однократном расчете полного вектора геодезических расстояний от каждой ячейки растра до всех метеостанций. Эта наиболее ресурсоемкая операция выполняется лишь один раз. В дальнейшем, полученный вектор расстояний применяется ко всем временным срезам (декадам) для вычисления интерполированных значений, что устраняет основную вычислительную избыточность и обеспечивает сублинейную зависимость времени обработки от числа декад. Для дальнейшего повышения производительности применяется механизм параллельной обработки на уровне центрального процессора, реализованный посредством динамического разделения растра на независимые вычислительные блоки (батчи). Размер батчей адаптивно регулируется с учетом доступной оперативной памяти, что гарантирует стабильность и масштабируемость решения на системах различной мощности. Апробация метода на реальных метеорологических данных за период 2015-2024 годов продемонстрировала радикальное сокращение времени выполнения. В частности, обработка десяти декадных временных срезов на стандартном ноутбуке занимает менее 3,5 минут, а на серверной платформе – около 3 минут, что представляет собой многократное ускорение по сравнению с традиционными реализациями. Таким образом, разработанное решение делает оперативную обработку больших пространственно-временных метеорологических массивов реальностью для широкого круга исследователей, открывая новые возможности для климатического мониторинга, агрометеорологии и геоинформационного анализа без необходимости привлечения специализированного дорогостоящего оборудования.

Метод обратного взвешивания по расстоянию; пространственная интерполяция; векторизация вычислений; параллельная обработка; геодезические расстояния; декадные метеорологические данные; оптимизация производительности.

O.M. Golozubov, A.V. Kozlovskiy, E.V. Melnik, Y.E. Melnik, A.N. Samoilov

**OPTIMIZATION OF THE COMPUTATIONAL SCHEME
FOR THE INTERPOLATION OF DECADEAL METEOROLOGICAL DATA
BY INVERSE DISTANCE WEIGHTING WITH PARALLEL PROCESSING
OF MULTIPLE TIME SLICES**

The present study is devoted to solving the problem of computational inefficiency in spatial interpolation of large arrays of decadal meteorological data using the inverse distance weighting method. Traditional approaches involving sequential and independent processing of each time slice demonstrate a linear increase in execution time and significant RAM consumption, which becomes a critical barrier to the rapid construction of detailed and geographically linked raster fields in GeoTIFF format. This significantly limits the use of the method in tasks requiring rapid processing of long-term data archives. The purpose of this work is to develop and validate an optimized computational scheme that can radically reduce time costs while maintaining the completeness and accuracy of the results. The key scientific novelty of the

proposed approach lies in the fundamental rethinking of the computational process. Instead of repeating identical operations many times, a scheme is proposed based on a single calculation of the full vector of geodetic distances from each grid cell to all weather stations. This most resource-intensive operation is performed only once. Subsequently, the resulting distance vector is applied to all time slices (decades) to calculate the interpolated values, which eliminates the main computational redundancy and ensures a sublinear dependence of processing time on the number of decades. To further improve performance, a parallel processing mechanism is used at the CPU level, implemented by dynamically dividing the raster into independent computing units (batches). The size of the batches is adaptively adjusted taking into account the available RAM, which guarantees the stability and scalability of the solution on systems of various capacities. The testing of the method on real meteorological data for the period 2015-2024 demonstrated a radical reduction in the execution time. In particular, processing ten decade time slices on a standard laptop takes less than 3.5 minutes, and on a server platform it takes about 3 minutes, which represents a multiple acceleration compared to traditional implementations. Thus, the developed solution makes the operational processing of large spatial and temporal meteorological arrays a reality for a wide range of researchers, opening up new opportunities for climate monitoring, agrometeorology and geoinformation analysis without the need for specialized expensive equipment.

Inverse distance weighting method; spatial interpolation; vectorization of calculations; parallel processing; geodetic distances; decade-long meteorological data; performance optimization.

Введение. Современный этап развития климатологии, агрометеорологии и геоинформационных технологий характеризуется стремительным ростом объёмов пространственно-временных данных, получаемых с глобальных и региональных сетей метеорологических наблюдений. Декадные ряды метеорологических параметров, представляющие собой усреднённые значения за десятидневные интервалы, составляют фундаментальную основу для построения климатических моделей, оценки сезонных трендов, прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур и оперативного реагирования на экстремальные погодные явления. В условиях изменения климата и увеличения плотности наблюдательных сетей объём таких данных достигает десятков и сотен тысяч записей на один регион, что создаёт серьёзные вызовы для их обработки в разумные сроки [1–3].

Одной из центральных задач при работе с такими массивами является построение непрерывных пространственных полей метеорологических параметров (например, температуры) на регулярной сетке высокого разрешения. Среди множества методов пространственной интерполяции особое место занимает метод обратного взвешивания по расстоянию (Inverse Distance Weighting, IDW), который сохраняет популярность благодаря своей вычислительной простоте, физической интерпретируемости и отсутствию необходимости в сложной статистической калибровке. При правильной реализации он обеспечивает приемлемую точность при умеренных вычислительных затратах, что делает его востребованным в оперативных системах мониторинга и научных исследованиях [4].

Однако при переходе к обработке обширных территорий – например, регионов размером в сотни километров с разрешением 1 угловая секунда, что соответствует сетке в миллионы ячеек – и одновременном учёте множества временных срезов (декад) стандартные программные реализации IDW сталкиваются с критическими ограничениями по производительности. Последовательная интерполяция каждого временного слоя независимо от других приводит к тому, что вычислительное время измеряется часами и сутками даже на современных рабочих станциях. Такие задержки делают невозможным использование результатов в оперативных задачах, где требуется получение готовых растровых карт в течение нескольких минут после поступления новых данных.

Дополнительную сложность вносит необходимость сохранения полного массива выходных значений – не статистических сводок или агрегированных показателей, а именно детализированных растров для каждой декады в географически привязанном формате, пригодном для дальнейшего анализа в геоинформационных системах (ГИС). Это исключает возможность радикального упрощения вычислений за счёт потери информации. При этом аппаратные ограничения – в первую очередь, объём оперативной памяти и пропускная способность процессора – накладывают жёсткие рамки на масштабируемость традиционных подходов [5].

В этих условиях возникает настоятельная потребность в новых вычислительных схемах, которые позволили бы преодолеть указанные барьеры без привлечения специализированного оборудования, такого как графические или нейронные процессоры. Решение должно быть универсальным, воспроизводимым и доступным для широкого круга исследователей и специалистов, работающих на стандартных вычислительных платформах. Особое значение приобретает переосмысление внутренней организации вычислительного процесса: переход от послышной обработки к одновременному учёту всех временных срезов, оптимизация доступа к памяти и эффективное использование параллелизма на уровне центрального процессора.

Настоящая работа посвящена рассмотрению этих актуальных вопросов. В ней последовательно анализируются вызовы, связанные с обработкой больших массивов декадных метеорологических данных, оцениваются ограничения существующих программных решений, предлагается новый подход к организации вычислений, описываются детали его реализации и приводятся результаты экспериментального тестирования на реальных данных. Целью является демонстрация того, что за счёт продуманной схемы вычислений и оптимального использования доступных аппаратных ресурсов возможно достижение качественного скачка в производительности при сохранении полной детализации и точности выходных растров.

Описание задачи и ожидаемых результатов. Задача настоящей работы состоит в оптимизации вычислительного процесса пространственной интерполяции метеорологических данных методом обратного взвешивания по расстоянию при одновременной обработке множества последовательных временных срезов. В центре внимания находится вычислительная эффективность – способность получить полный и детализированный результат за время, существенно меньшее, чем при традиционных подходах.

Исходные данные – это дискретные наблюдения параметров с сети метеостанций, организованные в виде временных рядов. Требуется построить непрерывные поля данных параметров на регулярной географической сетке высокого разрешения для каждого из выбранных временных интервалов. Интерполяция должна учитывать сферическую геометрию Земли и использовать геодезические расстояния.

Главное ограничение: выходной результат должен быть полным. Это означает, что для каждого временного среза необходимо сохранить отдельный растровый слой, содержащий значения параметра во всех ячейках сетки, включая области с низкой плотностью наблюдений. Никакие упрощения, сводки или агрегации недопустимы – требуется полный архив растров в географически привязанном формате.

При обработке нескольких временных срезов традиционные методы приводят к неприемлемо высоким временным затратам – от часов до суток. Ожидаемым результатом является радикальное ускорение – сокращение времени выполнения до минут при сохранении всей полноты и детализации выходных данных.

Цель оптимизации – достичь такого уровня производительности, при котором время получения полного набора растровых полей параметров становится пренебрежимо малым по сравнению с временем сбора, подготовки и анализа исходных данных. Научная новизна и практическая ценность предлагаемого подхода заключается в преодолении временных барьеров без потери информации.

Обзор существующих решений. Пространственная интерполяция метеорологических данных методом обратного взвешивания по расстоянию широко применяется в климатологии и геоинформатике благодаря своей простоте и интерпретируемости. На протяжении десятилетий разработано множество программных реализаций этого метода, встроенных как в коммерческие геоинформационные системы (ArcGIS, QGIS) [6], так и в специализированные научные пакеты (R, Python, MATLAB) [7–9]. Однако большинство из них ориентировано на обработку единичного временного слоя и не учитывает специфику работы с большими последовательностями временных срезов при сохранении полного массива выходных данных.

В коммерческих ГИС-платформах, таких как ArcGIS Pro, IDW реализован с высокой степенью оптимизации для отдельных растров, однако обработка множества декад требует ручного или скриптового запуска интерполяции для каждого слоя [10]. Это приводит к значительным временным затратам, особенно при высоком разрешении сетки. Кроме того, такие системы часто требуют лицензирования и не всегда обеспечивают гибкость в управлении памятью при пакетной обработке.

В среде открытого программного обеспечения популярны реализации на основе библиотек GDAL и SciPy. Например, в QGIS инструмент «IDW Interpolation» позволяет автоматизировать обработку через модельер или Python-консоль, но при этом каждый временной срез обрабатывается независимо [11]. Аналогично, в Python-пакетах, таких как scikit-learn или rasterio в сочетании с numpy, пользователи могут написать собственные скрипты для циклической интерполяции, однако без специальной оптимизации такие решения демонстрируют линейный рост времени выполнения пропорционально числу декад.

Существуют и специализированные климатические платформы, такие как Climate Data Operators (CDO) или xESMF, которые поддерживают пакетную обработку сеточных данных. Однако они ориентированы в первую очередь на работу с регулярными сетками (например, реанализами ERA5), а не на интерполяцию неравномерно распределённых точечных наблюдений. Применение IDW в таких системах либо отсутствует, либо реализовано как вспомогательная функция с ограниченной производительностью [12].

Более продвинутые подходы, основанные на параллельных вычислениях, используют GPU (например, через библиотеки CuPy или TensorFlow) [13] или распределённые системы (Dask, Spark) [14]. Такие решения действительно ускоряют интерполяцию, но требуют наличия соответствующего оборудования и существенно усложняют развёртывание. Кроме того, при работе с геодезическими расстояниями возникают сложности с точным переносом вычислений на GPU, а также с сохранением совместимости выходных GeoTIFF-файлов.

Наконец, научные публикации предлагают различные модификации IDW – адаптивный выбор степени расстояния, ограничение радиуса влияния, комбинирование с кригингом – но практически все они сосредоточены на улучшении точности, а не на радикальном сокращении времени выполнения при сохранении полного массива данных. Известные решения не решают задачу одновременной интерполяции по всем временным срезам с однократным вычислением расстояний и векторным применением весов – подход, который мог бы устранить основную избыточность вычислений [15].

Получается, что несмотря на обилие инструментов, отсутствует универсальное, эффективное и доступное решение, способное обработать несколько декадных срезов за минуты на стандартном оборудовании при сохранении полного набора выходных растров.

Предлагаемое решение. Для преодоления ограничений существующих подходов предлагается новая схема вычислений, ориентированная на одновременную интерполяцию по всем временным срезам при сохранении полного массива выходных данных. В отличие от традиционной схемы, где каждый декадный слой обрабатывается независимо и последовательно, разработанный метод устраняет основную вычислительную избыточность – многократное повторение одних и тех же операций по расчёту геодезических расстояний.

Первый способ сократить время вычислений – это использование векторизации вычислений. Идея заключается в том, чтобы, где это возможно, применить повторяемую операцию один раз на весь набор данных [16, 17]. Одной из частей таких вычислений стали геодезические расстояния от каждой ячейки растра до всех метеостанций. Они вычисляются один раз при расчёте интерполяции для каждой клетки. Далее полученный массив расстояний применяется векторно ко всем выбранным декадам одновременно, что позволяет за одну операцию получить полные значения параметра для заданной координаты за весь анализируемый период.

Такое переосмысление структуры вычислений даёт возможность радикально сократить общее время выполнения. Вместо линейного роста трудоёмкости пропорционально числу декад достигается сублинейная зависимость, где основная нагрузка приходится на однократное вычисление расстояний, а последующая интерполяция по времени выполняется с минимальными затратами.

Дополнительно реализуется параллельная обработка. Существуют методы, позволяющие производить такие расчеты на нескольких устройствах [18, 19], однако в рассматриваемом случае это не является оптимальным решением, так как все данные находятся на одном носителе информации. В данной ситуации гораздо эффективнее параллелизм на уровне центрального процессора с динамическим разбиением растра на незави-

симые блоки [20]. Это устраняет недостаток, связанный с передачей информации по сети, что может значительно замедлять вычисления. При таком методе расчетов каждый блок обрабатывается в отдельном вычислительном потоке, что обеспечивает эффективное использование всех доступных ядер процессора без необходимости в специализированном оборудовании. Управление памятью осуществляется автоматически: размер блока подбирается с учётом доступного объёма оперативной памяти, что гарантирует стабильную работу даже на системах среднего уровня. На рис. 1 визуальным образом представлено изменение схемы расчётов для наглядной демонстрации ускорения вычислений.

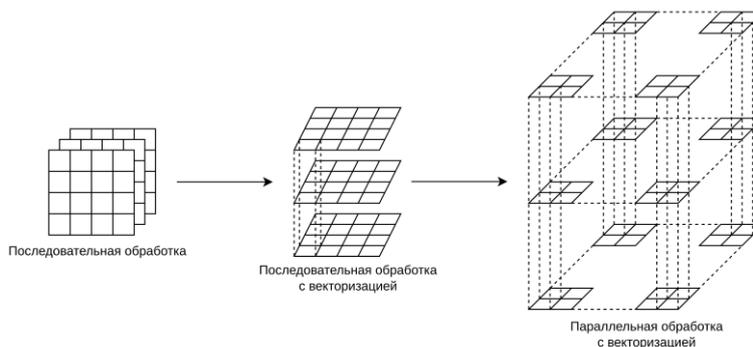


Рис. 1. Изменение схемы расчётов

Предлагаемое решение полностью сохраняет точность и полноту выходных данных. Все растровые слои формируются в географически привязанном формате с сохранением всех интерполированных значений, включая области с пропусками. Используется стандартный метод IDW с настраиваемой степенью расстояния, геодезические расчёты выполняются на эллипсоиде WGS84, а выходные файлы соответствуют спецификациям GeoTIFF.

Разработанный подход представляет собой универсальное, воспроизводимое и высокопроизводительное решение, которое позволяет перейти от многократных часов к минутам выполнения при обработке больших последовательностей временных срезов. Он не требует GPU, не зависит от коммерческого ПО и может быть развёрнут на любой современной вычислительной платформе.

Реализация. Реализация предлагаемого решения выполнена на языке Python с использованием стандартных библиотек, обеспечивающих высокую производительность и совместимость. Основной исполняемый модуль представляет собой командно-строчный интерфейс, который координирует весь процесс обработки – от загрузки входных данных до записи выходных GeoTIFF-файлов. Вспомогательный модуль содержит векторизованную реализацию IDW-интерполяции и отвечает за выполнение вычислений над отдельными блоками растра.

На этапе инициализации программа считывает входной CSV-файл с метеорологическими данными и JSON-файл с границами строк растра. Данные о значениях параметра группируются по ключу декады, формируя словарь, где каждому временному срезу соответствует массив значений параметров на станциях. Одновременно извлекаются уникальные координаты станций, которые используются для однократного вычисления геодезических расстояний.

Одним из главных элементов реализации является массив расстояний, формируемый с помощью библиотеки `ruroj.Geod`. Для каждой ячейки растра, ограниченной заданными границами, рассчитываются расстояния от левых нижних углов всех ячеек до каждой метеостанции. Эти вычисления выполняются векторно с использованием `numpy` и сразу применяются для расчёта интерполяции в конкретной ячейке.

Процесс интерполяции организован по принципу пакетной обработки строк раstra. Растр динамически разбивается на блоки (батчи), размер которых определяется исходя из целевого потребления оперативной памяти – по умолчанию около 200 МБ на батч. Каждый батч передаётся в отдельный рабочий процесс через `concurrent.futures.ProcessPoolExecutor`. Внутри процесса выполняется векторная интерполяция: для каждой ячейки батча и всех выбранных декад одновременно вычисляются веса IDW, а затем – недостающее значение параметра.

Запись результатов осуществляется с использованием библиотеки `rasterio`. Для каждой декады формируется отдельный GeoTIFF-файл с географической привязкой, сжатием (по умолчанию `zstd`) и блочной структурой, оптимизированной для последующего чтения в ГИС. Все выходные файлы сохраняются в указанной пользователем директории с именами, отражающими ключ декады.

Программа оснащена системой мониторинга и логирования. С помощью `tqdm` отображается текстовый прогресс-бар, показывающий количество обработанных батчей и оставшееся время. Библиотека `rsutil` используется для контроля пикового потребления памяти. По завершении выводится отчёт, содержащий общее время выполнения, среднее время на батч, коэффициент ускорения относительно последовательной обработки и максимальный объём использованной оперативной памяти.

Гибкость настройки реализована через аргументы командной строки с использованием `argparse`. Пользователь может указать начальную и конечную декаду, степень IDW, пути к входным файлам, выходную директорию, количество рабочих процессов, метод и уровень сжатия. Значения по умолчанию подобраны для баланса между производительностью и качеством.

Реализация полностью автономна, не требует установки дополнительного ПО помимо Python и указанных библиотек, и может быть запущена на любой современной системе – от ноутбука до серверной платформы. Благодаря использованию только CPU-ориентированных вычислений и стандартных форматов данных обеспечивается высокая воспроизводимость и переносимость результатов.

Эксперименты и результаты. Для оценки эффективности разработанного решения проведена серия экспериментов на реальных метеорологических данных за период 2015–2024 годов. Область интереса охватывала территорию 37–44° восточной долготы и 45–50° северной широты с разрешением 1 угловая секунда, что соответствует раstrу размером 25 200 × 18 000 ячеек. Использовались два вычислительных узла: ноутбук с процессором 13th Gen Intel Core i7-13650HX (14 ядер, 20 потоков) и 16 ГБ оперативной памяти, а также сервер с двумя процессорами Intel Xeon Gold 6430 (всего 64 ядра, 128 физических потоков) и 256 ГБ оперативной памяти.

Оценка вычислительной сложности проведена в идеализированных условиях, где общее время выполнения складывается из инициализации, расчёта расстояний, интерполяции и записи файлов. В последовательной реализации расстояния и веса вычисляются для каждой ячейки и каждой декады отдельно, поэтому общее время выражается как

$$T_{\text{seq}} = T_{\text{init}} + (T_1^{\text{dist}} \cdot Q + T_1^{\text{proc}} \cdot M) \cdot N + T_{\text{write}},$$

где T_{init} – время инициализации, T_1^{dist} – время расчёта одного геодезического расстояния, Q – число станций, N – число ячеек раstra, T_1^{proc} – время обработки одной ячейки для одной декады, M – число декад, T_{write} – время записи одного результата.

При векторизации расстояния вычисляются один раз, а интерполяция выполняется векторно по всем декадам, поэтому время расчёта расстояний становится $T_1^{\text{dist-vec}} = (T_1^{\text{dist}} \cdot Q \cdot M) / S$, где S – коэффициент ускорения векторных операций, а время обработки одной ячейки – $T_1^{\text{proc-vec}} = T_1^{\text{proc}} \cdot N$. Общее время:

$$T_{\text{vec}} = T_{\text{init}} + (T_1^{\text{dist-vec}} + T_1^{\text{proc}}) \cdot N + T_{\text{write}}.$$

При добавлении параллелизации вычисления и запись результатов распределяются по P процессам, поэтому время вычислений и записи включается в общий параллельный блок:

$$T_{\text{par}} = T_{\text{init}} + \frac{(T_1^{\text{dist-vec}} + T_1^{\text{proc}}) \cdot N + T_{\text{write}}}{p}$$

Эти формулы носят оценочный характер и описывают идеализированное поведение системы без учёта накладных расходов, кэш-эффектов и системных ограничений. Реальные замеры отражают фактическое поведение программы.

При увеличении числа декад (рис. 2) с 1 до 10 на ноутбуке общее время обработки остаётся практически постоянным – от 183,96 с до 211,43 секунд, что согласуется с ожиданием устранения линейной зависимости от M за счёт векторизации. Это означает, что $T_1^{\text{proc-vec}}$ не растёт с увеличением числа декад, а доминирующим остаётся однократный расчёт расстояний. Пиковое потребление памяти растёт линейно от 1,44 ГБ до 7,07 ГБ, что соответствует ~700 МБ на декаду при целевом размере батча 200 МБ и подтверждает предсказуемость управления ресурсами. На сервере время также стабильно: от 143,39 с до 182,90 секунд, память – до 12,99 ГБ, что свидетельствует о высокой масштабируемости подхода на более мощном оборудовании. Среднее время обработки одного батча на ноутбуке составило 61 секунду, что отражает эффективность векторных операций и параллельного распределения. Также стоит отметить, что для вычислений были выбраны оптимальные количества воркеров, а именно 20 для ноутбука и 64 для сервера.

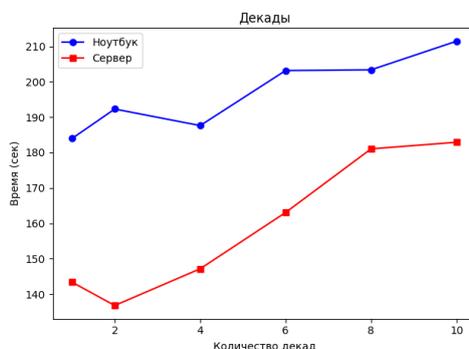


Рис. 2. Зависимость времени выполнения от количества декад

При увеличении числа параллельных процессов (рис. 3) с 1 до 32 на ноутбуке время выполнения падает с 2041,29 секунд до 204,04 секунд, что согласуется с ожидаемым линейным масштабированием до предела физических ядер. Оптимальное значение достигается при 20–32 воркерах (205,62–204,04 с), дальнейшее увеличение до 256 не даёт прироста из-за насыщения процессора и ограничений ОС по открытию файлов. На сервере при переходе от 1 к 64 воркеров время снижается с 3541,53 секунд до 130,71 секунд, что близко к теоретическому максимуму при 128 физических потоках. Стабилизация на уровне 131–158 секундах при 128–256 воркерах подтверждает достижение физического предела параллелизма и соответствует оценочной модели с учётом параллельной записи файлов. Вычисления проводились на 10 декадах, так как это близкое к максимальному значению, при котором не случается переполнение кэша процессора.

При уменьшении разрешения (рис. 4) с 1" до 3600" число ячеек N падает в миллионы раз, и время выполнения на ноутбуке снижается с 203,60 секунд до 0,16 секунд – экспоненциальное ускорение, соответствующее доминированию фактора N в формулах T_{vec} и T_{par} . Даже при практически значимом разрешении 30" (достаточном для агрометеорологических задач) время составляет всего 3,30 с. На сервере аналогичная картина: от 189,21 секунд при 1" до 9,66 секунд при 3600", с минимальными значениями 9–17 секунд при разрешении от 30" до 3600". Это показывает, что при реальных прикладных задачах с умеренным разрешением обработка становится практически мгновенной, а предлагаемое решение масштабируется идеально по пространственной размерности. Здесь использовались ранее определённые постоянные значения количества декад и параллельных процессов.

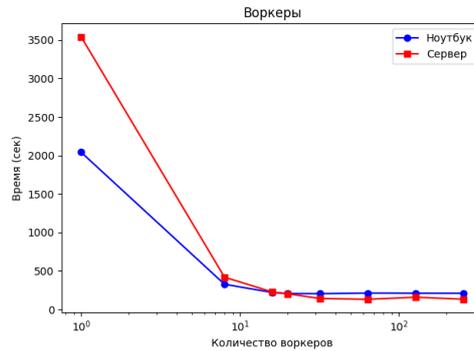


Рис. 3. Зависимость времени выполнения от количества параллельных процессов

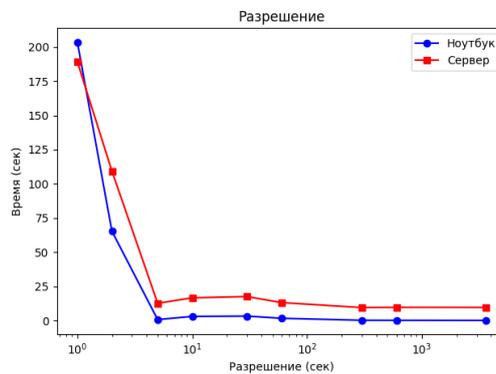


Рис. 4. Зависимость времени выполнения от пространственного разрешения

Заключение. Разработанный подход к оптимизации пространственной интерполяции метеорологических данных методом обратного взвешивания по расстоянию при одновременной обработке множественных декадных срезов полностью решает поставленную задачу. За счёт переосмысления схемы вычислений – однократного расчёта геодезических расстояний и векторного применения их ко всем временным слоям – устранена основная вычислительная избыточность традиционных реализаций. Параллельная обработка блоков раstra на центральном процессоре с динамическим управлением памятью обеспечила масштабируемость и стабильность работы на системах различной мощности.

Реализация представляет собой готовое к использованию решение, интегрирующее все этапы – от загрузки данных до записи GeoTIFF-файлов. Программа сохраняет полный массив выходных значений, корректно обрабатывает пропуски и области с низкой плотностью станций, поддерживает сжатие и географическую привязку в соответствии со стандартами ГИС.

Экспериментальные результаты на реальных данных за 2015–2024 годы подтверждают высокую эффективность: обработка 10 декад на ноутбуке с процессором Intel Core i7-13650HX занимает менее 3,5 минут, на сервере с двумя Intel Xeon Gold 6430 – около 3 минут. Ускорение относительно последовательной с применением векторизации реализации достигает 10 и 27 раз соответственно (отличие по скорости выполнения от чистой последовательной реализации будет определяться также количеством одновременно обработанных декад). Время выполнения практически не зависит от количества декад благодаря векторизации, линейно снижается с ростом числа параллельных процессов до предела ядер и экспоненциально падает при уменьшении пространственного разрешения. Потребление памяти остаётся контролируемым – около 700 МБ на декаду при целевом размере батча 200 МБ.

Полученные результаты демонстрируют, что за счёт продуманной организации вычислительного процесса и эффективного использования стандартных возможностей центрального процессора возможно достижение производительности, ранее недоступной без специализированного оборудования. Разработанное решение делает оперативную обработку больших пространственно-временных метеорологических массивов реальностью для широкого круга исследователей и специалистов, открывая новые возможности в климатическом мониторинге, агрометеорологии и геоинформационном анализе.

Исследование выполнено при поддержке Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета ("Приоритет 2030").

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волков А.Е., Суетина Н.В. Применение современных комплексов оптико-электронного наблюдения с высоким разрешением в системах аэрокосмического мониторинга Земли // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – № 12 (12).
2. Федотова Е.В., Маглинец Ю.А., Брежнев Р.В., Стародубцев А.И. Опыт прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур с использованием имитационных моделей // Вестник КрасГАУ. – 2020. – № 8 (161).
3. Клочков А.В., Соломко О.Б., Клочкова О.С. Влияние погодных условий на урожайность сельскохозяйственных культур // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 2.
4. Калинин В.Г., Суманеева К.И., Русаков В.С. Анализ методов интерполяции пространственного распределения метеорологических характеристик при расчетах весеннего снеготаяния // Географический вестник. – 2017. – № 2 (41).
5. Братков В.В., Бекмурзаева Р.Х., Бекмурзаева Л.Р. Возможности ГИС-технологий для оценки и мониторинга климатических условий Макажойской котловины (Чеченская Республика) // Юг России: экология, развитие. – 2024. – № 2.
6. Ботнева Ю.С., Потапов А.А. Применение геоинформационных систем в сельском хозяйстве // Вопросы науки и образования. – 2018. – № 10 (22).
7. Архипов А.В., Пряников В.С. Математическое моделирование магнитного поля Земли в системе Matlab // Вестник ЧГУ. – 2008. – № 2.
8. Тимирбаев В.Э. Геоинформационная система для мониторинга и анализа геомагнитных спутниковых наблюдений // Проблемы недропользования. – 2022. – № 1 (32).
9. Коротеев И.В., Брынь М.Я. Построение пользовательского интерфейса путем интеграции программ на языке R в систему Microsoft Visual Studio при обработке данных для задач геодезии // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2018. – № 2 (14).
10. Васильев А.А., Чащин А.Н., Лобанова Е.С. Пространственное моделирование магнитной восприимчивости почв центральной части г. Перми // Социально-экологические технологии. – 2021. – № 4.
11. Беликова М.Ю., Каранина С.Ю., Каранин А.В., Глебова А.В. Визуализация и анализ данных сети WWLLN на территории Алтае-Саянского региона средствами веб-ГИС // Кибернетика и программирование. – 2018. – № 2.
12. Кровнин А.С., Мельников С.П., Артеменков Д.В., Мурый Г.П., Никитенко А.И. Влияние крупномасштабных климатических факторов на динамику запаса тихоокеанской сайры // Тр. ВНИРО. – 2018.
13. Баранов М.Д., Кузьмин Д.А., Жукова Ж.С. Сравнение подходов к написанию нейронных сетей на Python // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – № 5-1 (92).
14. Потапов В.П., Костылев М.А., Попов С.Е. Поточковая обработка радарных данных в распределенной среде Apache Spark // Вестник СПбГУ. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2017. – № 2.
15. Рязанов С.С., Кулагина В.И. Сравнительный анализ методов интерполяции топографических данных для создания цифровой модели рельефа на примере национального парка "Нижняя Кама" // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2022. – № 3.
16. Исупов К.С., Князьков В.С., Куваев А.С. Суммирование многократной точности на центральных и графических процессорах с использованием библиотеки MPRES // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 8 (202).
17. Гетманский В.В., Мовчан Е.О., Андреев А.Е. Ускорение расчета динамического напряженно-деформированного состояния с помощью наборов векторных инструкций // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 11 (184).

18. Козловский А.В., Мельник Э.В. Исследование эффективности алгоритмов обработки информации при формировании изображений группой мобильных объектов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2025. – 13 (4).
19. Козловский А.В. Распараллеливание обработки информации при формировании составных изображений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 92-103.
20. Цымблер М.Л., Полуянов А.Н., Краева Я.А. Параллельный алгоритм восстановления сенсорных данных в режиме реального времени для многоядерного процессора // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2022. – № 3.

REFERENCES

1. Volkov A.E., Suetina N.V. Primenenie sovremennykh kompleksov optiko-elektronnoho nablyudeniya s vysokim razresheniem v sistemakh aerokosmicheskogo monitoringa Zemli [Application of modern high-resolution optoelectronic observation systems in aerospace Earth monitoring systems], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, No. 12 (12).
2. Fedotova E.V., Maglinets Yu.A., Brezhnev R.V., Starodubtsev A.I. Opyt prognozirovaniya urozhaynosti sel'skokhozyaystvennykh kultur s ispol'zovaniem imitatsionnykh modeley [The possibilities of GIS technologies for assessing and monitoring the climatic conditions of the Makazhoy Fepression (Chechen Republic, Russia)], *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University], 2020, No. 8 (161).
3. Klochkov A.V., Solomko O.B., Klochkova O.S. Vliyanie pogodnykh usloviy na urozhaynost' sel'skokhozyaystvennykh kultur [The influence of weather conditions on the yield of agricultural crops], *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy], 2019, No. 2.
4. Kalinin V.G., Sumaneeva K.I., Rusakov V.S. Analiz metodov interpolatsii prostranstvennogo raspredeleniya meteorologicheskikh kharakteristik pri raschetakh vesennego snegotayaniya [Analysis of interpolation methods for the spatial distribution of meteorological characteristics in the calculation of spring snowmelt], *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin], 2017, No. 2 (41).
5. Bratkov V.V., Bekmurzaeva R.Kh., Bekmurzaeva L.R. Vozmozhnosti GIS-tekhnologiy dlya otsenki i monitoringa klimaticheskikh usloviy Makazhoyskoy kotloviny (Chechenskaya Respublika) [The possibilities of GIS technologies for assessing and monitoring the climatic conditions of the Makazhoy Fepression (Chechen Republic, Russia)], *Yug Rossii: ekologiya, razvitie* [South of Russia: ecology, development], 2024, No. 2.
6. Botneva Yu.S., Potapov A.A. Primenenie geoinformatsionnykh sistem v sel'skom khozyaystve [Application of geoinformation systems in agriculture], *Voprosy nauki i obrazovaniya* [Issues of science and education], 2018, No. 10 (22).
7. Arkhipov A.V., Pryanikov V.S. Matematicheskoe modelirovanie magnitnogo polya Zemli v sisteme Matlab [Mathematical modelling of the magnetic field of the ground in Matlab system], *Vestnik ChGU* [Bulletin of the Chuvash State University], 2008, No. 2.
8. Timirbaev V.E. Geoinformatsionnaya sistema dlya monitoringa i analiza geomagnitnykh sputnikovykh nablyudeniy [Geoinformation system for monitoring and analysis of geomagnetic satellite observations], *Problemy nedropol'zovaniya* [Subsoil Use Problems], 2022, No. 1 (32).
9. Koroteev I.V., Bryn' M.Ya. Postroenie pol'zovatel'skogo interfeysa putem integratsii programm na yazyke R v sistemu Microsoft Visual Studio pri obrabotke dannykh dlya zadach geodezii [Creation of the User Interface by Integration of Programs at Language R with the Microsoft Visual Studio System at Data Processing for Problems of Geodesy], *Intellektual'nye tekhnologii na transporte* [Intelligent Technologies on Transport], 2018, No. 2 (14).
10. Vasil'ev A.A., Chashchin A.N., Lobanova E.S. Prostranstvennoe modelirovanie magnitnoy vospriimchivosti pochv tsentral'noy chasti g. Permi [Spatial modeling of the magnetic susceptibility of soils in the central part of Perm], *Sotsial'no-ekologicheskie tekhnologii* [Socio-ecological technologies], 2021, No. 4.
11. Belikova M.Yu., Karanina S.Yu., Karanin A.V., Glebova A.V. Vizualizatsiya i analiz dannykh seti WWLLN na territorii Altae-Sayanskogo regiona sredstvami veb-GIS [Visualization and analysis of WWLLN network data in the Altai-Sayan region by means of web-GIS], *Kibernetika i programirovanie* [Cybernetics and Programming], 2018, No. 2.
12. Krovnin A.S., Mel'nikov S.P., Artemenkov D.V., Muryy G.P., Nikitenko A.I. Vliyanie krupnomasshtabnykh klimaticheskikh faktorov na dinamiku zapasa tikhoookeanskoy sayry [Impact of the large-scale climatic factors on dynamics of pacific saury stock], *Tr. VNIRO* [Proceedings of VNIRO], 2018.
13. Baranov M.D., Kuz'min D.A., Zhukova Zh.S. Sravnenie podkhodov k napisaniyu neyronnykh setey na Python [Comparison of approaches to writing neural networks in Python], *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [International Journal of Humanities and Natural Sciences], 2024, No. 5-1 (92).
14. Potapov V.P., Kostylev M.A., Popov S.E. Potokovaya obrabotka radarnykh dannykh v raspredelennoy srede Apache Spark [The streaming processing of sar data in distributed environment with Apache Spark], *Vestnik SPbGU. Seriya 10. Prikladnaya matematika. Informatika. Protssesy upravleniya* [Vestnik of Saint Petersburg University. Series 10. Applied mathematics. Computer science. Control processes], 2017, No. 2.

15. *Ryazanov S.S., Kulagina V.I.* Sravnitel'nyy analiz metodov interpolatsii topograficheskikh dannykh dlya sozdaniya tsifrovoy modeli rel'efa na primere natsional'nogo parka "Nizhnaya Kama" [Comparative analysis of methods of the digital terrain model interpolation (case study of the "Nizhnaya Kama" national park)], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* [Moscow University Herald. Series 5. Geography], 2022, No. 3.
16. *Isupov K.S., Knyaz'kov V.S., Kuvaev A.S.* Summirovaniye mnogokratnoy tochnosti na tsentral'nykh i graficheskikh protsessorakh s ispol'zovaniem biblioteki MPRES [Summation of the multiple accuracy on central and graphic processors using the MPRES library], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 8 (202).
17. *Getmanskii V.V., Movchan E.O., Andreev A.E.* Uskorenie rascheta dinamicheskogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya s pomoshch'yu naborov vektornykh instruktsiy [Dynamical stress-strain simulation speedup using SIMD instructions], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 11 (184).
18. *Kozlovskiy A.V., Mel'nik E.V.* Issledovanie effektivnosti algoritmov obrabotki informatsii pri formirovaniy izobrazheniy gruppy mobil'nykh ob"ektov [Investigation of the effectiveness of information processing algorithms in the formation of images by a group of mobile objects], *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology], 2025, 13 (4).
19. *Kozlovskiy A.V.* Rasparallelivaniye obrabotki informatsii pri formirovaniy sostavnykh izobrazheniy [Parallelization of information processing in the formation of composite images], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2025, No. 1, pp. 92-103.
20. *Tsymler M.L., Poluyanov A.N., Kraeva Ya.A.* Parallelnyy algoritm vosstanovleniya sensornykh dannykh v rezhime real'nogo vremeni dlya mnogoyadernogo protsessora [Parallel algorithm for real-time sensor data recovery for a many-core processor], *Vestnik YuUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Informatics], 2022, No. 3.

Голозубов Олег Модестович – Южный федеральный университет; e-mail: omgolozubov@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +78632184000, доб. 14101; старший научный сотрудник Исследовательской лаборатории «Интеллектуальные агроэкосистемы».

Козловский Александр Вячеславович – Южный федеральный университет; e-mail: kozlovskiy@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79888980779; младший научный сотрудник Исследовательской лаборатории искусственных почвенных технологий и цифровых решений.

Мельник Эдуард Всеволодович – Южный федеральный университет; e-mail: evmelnik@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; профессор кафедры вычислительной техники.

Мельник Ярослав Эдуардович – Южный федеральный университет; e-mail: iamelnik@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79885153420; инженер Исследовательской лаборатории искусственных почвенных технологий и цифровых решений.

Самойлов Алексей Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: asamoylov@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +78632184000, доб. 14101; старший научный сотрудник Лаборатории «Фронтальная лаборатория «Биоинженерия ризосферы»».

Golozubov Oleg Modestovich – Southern Federal University; e-mail: omgolozubov@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632184000, доб. 14101; senior researcher, Intelligent Agroecosystems Research Laboratory.

Kozlovskiy Alexander Vyacheslavovich – Southern Federal University; e-mail: kozlovskiy@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79888980779; junior researcher, Research Laboratory of Artificial Soil Technologies and Digital Solutions.

Melnik Eduard Vsevolodovich – Southern Federal University; e-mail: evmelnik@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371656; professor, Department of Computer Science.

Melnik Yaroslav Eduardovich – Southern Federal University; e-mail: iamelnik@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79885153420; engineer, Research Laboratory of Artificial Soil Technologies and Digital Solutions.

Samoylov Aleksey Nikolayevich – Southern Federal University; e-mail: asamoylov@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632184000, доб. 14101; senior researcher, Laboratory "Frontier Laboratory of Rhizosphere Bioengineering".

А.А. Диченко, И.И. Левин, Д.А. Сорокин

**МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Для реконфигурируемых вычислительных систем на базе ПЛИС эффективными прикладными программами являются параллельно-конвейерные программы, обеспечивающие реальную производительность более 50% от пиковой. Статья посвящена решению проблемы сокращения времени их разработки. Вычислительные структуры таких программ используют большой объём вычислительного ресурса ПЛИС, функционирующих на высокой тактовой частоте. Однако одновременная максимизация объёма задействованного ресурса ПЛИС и тактовой частоты находится в некотором противоречии, поскольку при большом заполнении снижается вариативность размещения функциональных узлов вычислительных структур и коммутационная матрица ПЛИС при трассировке информационных каналов между ними не обеспечивает требуемых характеристик по времени распространения сигналов. Более того в современных САПР алгоритмы размещения и трассировки учитывают только архитектурные и геометрические особенности ПЛИС. Поэтому при использовании большого числа специализированных примитивов, вариативность размещения которых крайне мала, достижение высоких тактовых частот в автоматическом режиме синтеза практически невозможно. Для решения этой проблемы также необходимо учитывать информационные зависимости между функциональными узлами вычислительных структур, но характер информационных зависимостей решаемых задач различных предметных областей может существенно отличаться. Поэтому разработчики вынуждены каждый раз вручную размещать на ПЛИС функциональные узлы путём создания скриптовых инструкций топологических ограничений. Время формирования топологических ограничений для ПЛИС прежних поколений было приемлемым, поскольку они содержали, как правило, до нескольких сотен специализированных примитивов. Однако в современных ПЛИС их количество достигает нескольких тысяч и даже десятков тысяч штук, что приводит к значительному увеличению времени разработки эффективных прикладных программ. Предлагаемый метод позволяет автоматизировать процесс разработки топологических ограничений вычислительных структур. Исследования были проведены при разработке прикладных программ решения ряда задач на основе алгоритмов БПФ, AES и LU-разложения для реконфигурируемого компьютера «Tertius-2». В результате значительного сокращения временных затрат, обусловленных числом итераций оптимизации вычислительных структур, общее время синтеза было сокращено до трех раз.

Реконфигурируемая вычислительная система; ПЛИС; топологические ограничения вычислительных структур; синтез параллельно-конвейерных программ.

A.A. Dichenko, I.I. Levin, D.A. Sorokin

**METHOD FOR GENERATING TOPOLOGICAL CONSTRAINTS
OF COMPUTATIONAL STRUCTURES FOR RECONFIGURABLE COMPUTING
SYSTEMS**

For reconfigurable computing systems based on FPGAs, efficient application programs are parallel-pipeline programs that achieve real performance exceeding 50% of the peak. This article addresses the problem of reducing the development time of such programs. The computational structures of these programs utilize a large volume of FPGA resources operating at high clock frequencies. However, simultaneously maximizing both the amount of FPGA resources used and the clock frequency presents a certain contradiction: as resource utilization increases, the placement flexibility of the functional units of the computational structures decreases, and the FPGA switching matrix fails to provide the required signal propagation characteristics when routing information channels between them. Moreover, in modern CAD tools, placement and routing algorithms consider only the architectural and geometric features of the FPGA. Therefore, when a large number of specialized primitives with very limited placement flexibility are used, achieving high clock frequencies in automatic synthesis mode becomes virtually impossible. To address this problem, it is also necessary to consider the information dependencies between the functional units of the computational structures, but the nature of these dependencies in tasks from different subject areas can vary significantly. As a result, developers are often forced to manually place the functional units

of the computational structures on the FPGA by creating script-based instructions for topological constraints. In earlier generations of FPGAs, the time required to generate topological constraints was acceptable, as they typically contained only a few hundred specialized primitives. However, in modern FPGAs, the number of such primitives reaches several thousand or even tens of thousands, significantly increasing the development time of efficient application programs. The proposed method makes it possible to automate the process of developing topological constraints for computational structures. The research was carried out during the development of application programs for solving a range of problems based on FFT, AES, and LU decomposition algorithms for the reconfigurable computer "Tertius-2." As a result of significantly reducing the time required for optimization iterations of computational structures, the total synthesis time was reduced by up to three times.

Reconfigurable computing system; FPGA; topological constraints of computational structures; synthesis of parallel-pipeline programs.

Введение. В настоящее время реконфигурируемые вычислительные системы (PBC) [1] на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) успешно применяются для решения задач математической физики, криптографии, машинного обучения, цифровой обработки сигналов и многих других. Благодаря адаптации вычислительной структуры к информационному графу решаемой задачи [2], PBC демонстрируют высокую реальную производительность (более 50% от пиковой). В то же время реальная производительность традиционных высокопроизводительных систем на базе центральных и графических процессоров обычно не превышает 10-15% [3]. Такая эффективность PBC, как правило, обеспечивается за счёт работы на высоких по меркам ПЛИС тактовых частотах (выше 300 МГц) при использовании не менее 60% вычислительного ресурса (число конфигурируемых логических блоков CLB, блоков памяти BRAM или URAM, арифметических блоков DSP).

Однако время разработки прикладных программ для современных PBC, обеспечивающих высокую реальную производительность, даже высококвалифицированными специалистами составляет, как правило, от нескольких месяцев до года (иногда и больше). Это обусловлено не только применением низкоуровневых языков описания цифровых схем, таких как VHDL или Verilog, но и необходимостью синтеза вычислительной структуры параллельно-конвейерной программы, оптимальной по композиции двух параметров: объёму занимаемого вычислительного ресурса (заполнению) и тактовой частоте. При этом стандартные средства САПР [4, 5] автоматически не обеспечивают требуемых тактовых частот в вычислительных структурах с высоким заполнением ПЛИС.

В работе [6] на примере реализации задачи нагрузочного тестирования потребляемой мощности PBC описан типовой процесс, применяемый при разработке высокопроизводительных параллельно-конвейерных программ для PBC. Показано, что при автоматическом синтезе в САПР Vivado вычислительной структуры, заполняющей ПЛИС по CLB примерно на 70%, по DSP – на 100%, реконфигурируемый компьютер (ПК) «Tertius» будет функционировать на частоте 200 МГц. Если же ужесточить требования ко времени распространения сигнала в синтезируемой вычислительной структуре, то с помощью подбора оптимальной стратегии размещения и трассировки и наложения топологических ограничений на размещение примитивов DSP, возможно обеспечить функционирование ПК «Tertius» на частоте 400 МГц, и, соответственно, поднять его производительность в два раза без дополнительных аппаратных затрат. Однако для максимизации производительности за счёт увеличения частоты до 500 МГц (необходимое условие для качественной оценки потребляемой мощности PBC задачей нагрузочного тестирования) кроме перечисленного выше, потребовалось существенно модернизировать вычислительную структуру, включая переработку функциональных узлов. Это привело к значительному увеличению времени разработки прикладной программы, что обусловлено современными методологиями программирования для ПЛИС [9–11], предполагающими только ручную оптимизацию размещения вычислительной структуры с помощью топологических ограничений.

Как показывают исследования, время разработки топологических ограничений может быть сопоставимо со временем разработки самой вычислительной структуры, а иногда может и превышать его, поскольку для оптимального размещения её функциональ-

ных узлов на поле ПЛИС необходимо учитывать не только свойства примитивов, архитектурные и геометрические особенности ПЛИС, но и функциональные зависимости между узлами, а также зависимости от управления потоками данных [7, 8].

Кроме того, большое значение играет количество используемых примитивов типа BRAM, URAM или DSP в ПЛИС, которое может составлять от нескольких сотен до нескольких тысяч штук. При этом с каждым новым поколением степень интеграции ПЛИС неуклонно растёт (рис. 1), поэтому при переходе на новую элементную базу время разработки имеет тенденцию к пропорциональному увеличению. В связи с этим, *разработка методов генерации топологических ограничений вычислительных структур, позволяющих сократить время синтеза параллельно-конвейерных программ для РВС, является особо актуальной научной задачей.*



Рис. 1. Рост степени интеграции на примере ПЛИС AMD – Xilinx

Проблематика достижения высокой реальной производительности при высоком заполнении ПЛИС. Реальную производительность РВС P_R можно оценить по следующей формуле:

$$P_R = N \cdot \nu \cdot S, \quad (1)$$

где N – число функциональных устройств, ν – тактовая частота, S – скважность подачи данных.

Ключевым параметром, определяющим реальную производительность РВС при высоком заполнении ПЛИС, является тактовая частота работы вычислительной структуры. Скважность подачи данных также влияет на производительность, но для параллельно-конвейерной обработки она, как правило, равна единице (другие варианты скважности в данной статье не рассматриваются).

Предельно достижимая величина частоты в РВС зависит от физических параметров ПЛИС. Одним из таких параметров является класс скорости (Speed Grade) [12] используемой ПЛИС, обусловленный технологией изготовления. Однако, наибольшее влияние на величину тактовой частоты оказывает схема размещения вычислительной структуры в ПЛИС, которая во многом определяется архитектурными особенностями микросхемы. Как показано на рис. 2, современные ПЛИС имеют различное расположение встроенных интерфейсов и контактов ввода/вывода, могут содержать встроенные процессоры, а также зоны сопряжения кристаллов для составных ПЛИС. При переходе через такие специализированные области или при их обходе трассы между примитивами значительно удлиняются, что приводит к увеличению времени распространения сигнала.

Например, области физических выводов могут располагаться в средней части кристалла, что приводит к снижению тактовых частот при пересечении данных областей каналами, соединяющими функциональные узлы (рис. 3). Также распространённым случаем является пересечение каналом встроенных интерфейсов, таких как Ethernet, PCI Express, JTAG и тому подобных [7]. Основная проблема в данных случаях заключается в большой длине информационного канала, пересекающего специализированную область ПЛИС. Его длина вносит существенную задержку во время распространения сигнала, особенно если

содержит несколько уровней вложенной логики. Как показано в работе [8], данная проблема решается путём размещения функциональных узлов в непосредственной близости от границ пересекаемой специализированной области и добавлением блоков с нулевой логической нагрузкой типа «триггер-триггер». Также важными являются геометрические особенности кристалла. Например, в системах на кристалле часто встречается L-образная форма поля ПЛИС (семейства Versal, Arria 10 SX на рис. 2). При таком исполнении топология размещения усложняется, так как повышается вероятность возникновения более длинных трасс между функциональными узлами вычислительной структуры.

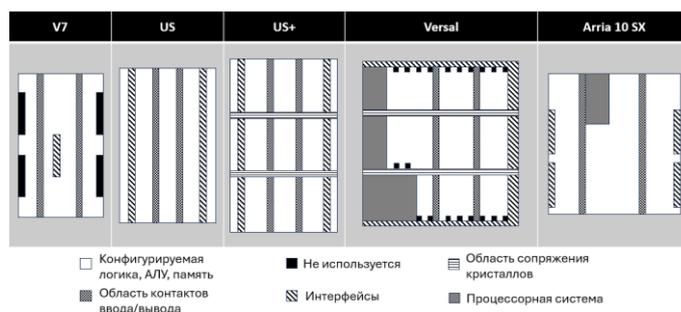


Рис. 2. Архитектура современных ПЛИС



Рис. 3. Пример пересечения связи области физических выводов ПЛИС

На величину тактовой частоты также влияет мощность коммутационного ресурса используемой ПЛИС (количество доступных физических каналов). На рис. 4 приведена фотография фрагмента коммутационной подсистемы ПЛИС XC7VU37P.

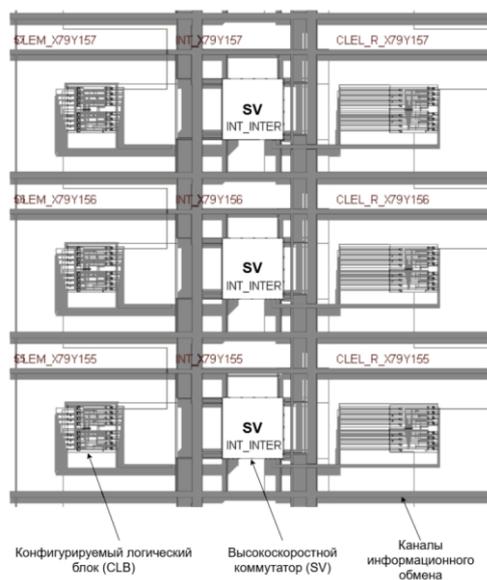


Рис. 4. Фрагмент коммутационной подсистемы ПЛИС XC7VU37P

Коммутационный ресурс ПЛИС представляет собой совокупность горизонтальных и вертикальных каналов информационного обмена, объединённых коммутаторами (SV). Количество каналов между SV ограничено, поэтому если функциональные узлы используют большое количество каналов и находятся в разных топологически разнесённых друг от друга конфигурируемых вычислительных блоках (CLB), то при высоком заполнении ресурсов, информационные каналы прокладываются неоптимальным маршрутом, что зачастую приводит к увеличению времени распространения сигнала между примитивами и, соответственно, падению тактовой частоты. Данная проблема особенно усиливается при расположении CLB в разных регионах синхронизации тактового сигнала.

Следует отметить, что современным ПЛИС свойственна неравномерность распределения вычислительного ресурса. Как правило, для синтеза вычислительных структур сложных задач необходимо задействовать не только логический ресурс (CLB), но и специализированный ресурс DSP, BRAM и URAM. Проведённые исследования показывают: при использовании в ПЛИС более 60% DSP и BRAM (URAM) без предварительного размещения таких примитивов САПР в автоматическом режиме обеспечивает реальную рабочую тактовую частоту ниже достижимой в два и более раз. Это обусловлено тем, что специализированного вычислительного ресурса в сотни раз меньше, чем логического, и распределён такой ресурс по кристаллу неравномерно (рис. 5).

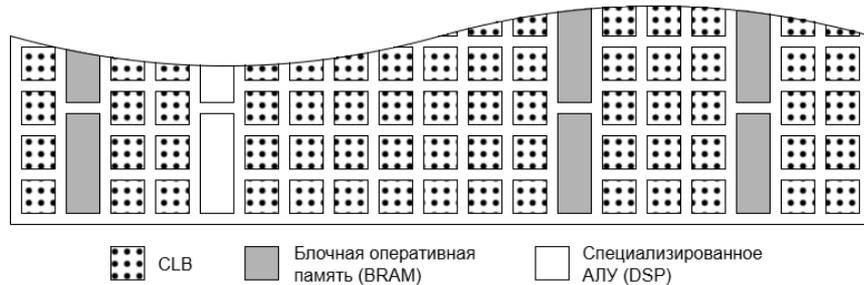


Рис. 5. Пример неравномерного распределения специализированного ресурса в ПЛИС XC7VU095

При высоком заполнении ПЛИС и высоких требованиях к тактовой частоте вариативность размещения специализированных примитивов DSP, BRAM и URAM в автоматическом режиме САПР становится крайне низкой. Поэтому методология производителей САПР предполагает ручное размещение примитивов вычислительной структуры с помощью инструментов локализации в определённых областях ПЛИС [9, 11]. Стоит отметить, что процесс оптимизации топологического размещения вычислительной структуры достаточно длительный и трудоёмкий, поскольку необходимо учитывать не только местоположение входных и выходных интерфейсов вычислительной структуры, местоположение встроенных периферийных устройств, схему распределения вычислительного ресурса на ПЛИС, но и функциональные зависимости между фрагментами вычислительной структуры.

При высоком заполнении и тактовой частоте размещение вычислительных структур разработчиком вручную было возможным для поколений ПЛИС Xilinx Series-6 [14, 15] и более ранних (Series-5, Series-4, Stratix III и т.п.), поскольку объём их специализированного вычислительного ресурса не превышал нескольких сотен примитивов. Однако для более современных поколений ПЛИС (UltraScale, UltraScale+, Artix 10, Agilex и т.п.) количество DSP, BRAM, URAM исчисляется тысячами и десятками тысяч штук [16–18] (табл. 1).

В таких микросхемах ручное формирование схем размещения вычислительных структур требует существенно больше времени, поскольку для каждого используемого специализированного примитива формируются топологические ограничения в виде скриптовых инструкций САПР. Например, если для ПЛИС поколения Series-6 разработчику при-

ходило «расставлять» от 600 до 4000 примитивов, то для ПЛИС поколения UltraScale+ этот объём составляет от 2000 до 15000. Кроме того, время формирования топологических ограничений может ещё увеличиться, потому что современные САПР не имеют инструментов автоматической проверки. Так, в процессе верификации схемы размещения в САПР необходимо выполнить размещение (Place Design) примитивов синтезируемой структуры на поле ПЛИС и проанализировать отчёты САПР на корректность применения топологических ограничений. В случае наличия ошибок файл топологических ограничений исправляется, и процесс верификации схемы размещения запускается заново. Стоит отметить, что для больших ПЛИС описание топологических ограничений при высоком заполнении может содержать десятки тысяч строк кода, что значительно увеличивает количество ошибок, связанных с человеческим фактором (опечатки, пропуски и т.п.).

Таблица 1

Объём специализированного вычислительного ресурса для различных поколений ПЛИС

Тип примитивов	Поколение ПЛИС				
	Virtex-6	Virtex-7	Virtex UltraScale	Virtex UltraScale+	Versal Premium
DSP , шт.	288-2016	1120-3600	600-2880	1320-12288	1140-14352
BRAM , шт.	312-2128	1500-3760	1260-2520	720-2016	535-6808
URAM , шт.	—	—	—	320-960	345-2549

После размещения выполняется этап трассировки (Route Design) связей между примитивами синтезируемой структуры, а затем для каждой связи производится расчёт времени распространения сигнала между примитивами (Timing Analysis). При наличии временных задержек схема размещения может быть модифицирована некоторое количество раз. Если ни одна из рассмотренных схем размещения не удовлетворяет по целевым параметрам, то дорабатывается или полностью перерабатывается функциональная схема вычислительной структуры с повторением процесса формирования схемы размещения и верификации. Если ни одна из рассмотренных модификаций не приводит к положительному результату, тогда необходимо снижать требования к заполнению и (или) тактовой частоте. Таким образом, время разработки параллельно-конвейерной программы зависит не только от объективных причин, но и субъективных.

Время t_{prog} разработки эффективной параллельно-конвейерной программы можно оценить по формуле

$$t_{prog} = t_{func} + t_{synth}, \quad (2)$$

где t_{func} – время разработки функциональной схемы, t_{synth} – время синтеза параллельно-конвейерной программы.

Время t_{func} может достигать нескольких месяцев в зависимости от квалификации разработчика, сложности реализуемого алгоритма и многих других факторов. Для простоты рассуждений будем считать, что функциональная схема разрабатывается один раз и в процессе синтеза вычислительной структуры не меняется (t_{func} – константа).

Время t_{synth} можно оценить по формуле

$$t_{synth} = k_1 (t_{sch} + k_2 \cdot t_{place}(v, U) + t_{route}(v, U)), \quad (3)$$

где t_{sch} – время разработки схемы размещения, t_{place} – время этапа компиляции Place Design, t_{route} – время этапа компиляции Route Design, U – заполнение, k_1 – количество итераций получения оптимальной схемы размещения, k_2 – количество итераций исправления технических ошибок.

Время t_{place} в большей степени зависит от заполнения микросхемы. Например, для ПЛИС XCKU095 t_{place} может быть от 0,5 до 4 часов. Время t_{route} зависит от тактовой частоты и заполнения. При высоких значениях v (более 300 МГц) и U (более 50%) t_{route} может быть от 2 до 36 часов. Более того, для современных ПЛИС, например, таких как

XCvU37P и более ресурсоёмких, время синтеза даже при автоматическом размещении средствами САПР ($t_{sch}=0, k_1=1, k_2=1$) может достигать 2-3 суток и при этом не гарантируется получение требуемых характеристик вычислительной структуры.

Таким образом, верификация схемы размещения и получение работоспособных параллельно-конвейерных программ, реализуется итерационным способом. В ходе верификации может многократно выполняться частичная либо полная компиляция проекта. При больших значениях коэффициентов k_1 и k_2 время синтеза параллельно-конвейерной программы может быть неприемлемым. Поэтому для сокращения времени поиска оптимальной схемы размещения вычислительной структуры и разработки топологических ограничений, обеспечивающих достижение требуемой реальной производительности, важно автоматизировать данные процессы, особенно для вычислительных структур с высоким заполнением ПЛИС и высокой тактовой частотой.

Традиционные алгоритмы размещения электронных компонентов, применяемые в современных САПР, выбирают в качестве критерия оптимизации размещения только топологические и геометрические свойства микросхем. При этом целевая функция может зависеть от длин связей, времени распространения сигнала, занимаемой площади вычислительной структурой и расчётного уровня энергопотребления [19, 20].

Предлагаемый метод генерации топологических ограничений для размещения вычислительных структур на ПЛИС учитывает не только геометрические и архитектурные особенности, но и специфику функциональной зависимости между устройствами (узлами) вычислительной структуры и зависимости от управления потоками данных для решаемых задач различных предметных областей. Это обуславливает в рамках предметной области использование типовых схем размещения. Например, для задач цифровой обработки сигналов характерны линейные и кольцевые схемы расстановки функциональных узлов (рис. 6,а), для задач линейной алгебры – линейные и мультилинейные (рис. 6,б), для криптографических задач и искусственных нейронных сетей – мультилинейные, кольцевые и мозаичные (рис. 6,в,г).

Поэтому для автоматизации процесса размещения необходимо использовать эвристические правила свойственные конкретным классам и подклассам решаемых задач.

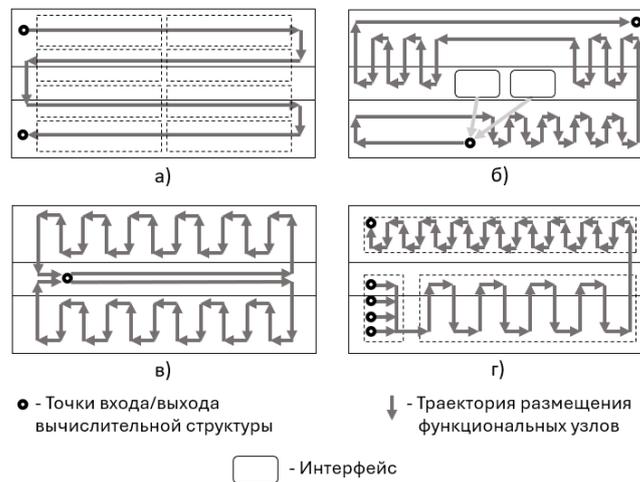


Рис. 6. Примеры схем размещения функциональных узлов некоторых задач

Схема размещения вычислительной структуры на ПЛИС зависит от алгоритма решения задачи, объёма и состава примитивов, связности между примитивами, мощности коммутационной матрицы ПЛИС, обеспечивающей прокладку информационных каналов между примитивами, требуемой производительности, тактовой частоты, требуемой энергоэффективности. Разработка оптимальной схемы размещения сводится к перебору различных вариантов размещения по композиции данных критериев.

Прежде чем приступить к разработке схемы размещения, необходимо задать базовые целевые характеристики, такие как производительность и время синтеза. При условии фиксированной тактовой частоты производительность определяется коэффициентом распараллеливания вычислений, а при условии фиксированного коэффициента распараллеливания – величиной тактовой частоты. Поэтому добиваться целевой производительности можно балансируя одним параметром относительно другого. Для достижения целевых показателей в рамках метода предлагается использовать три стратегии разработки схемы размещения: стратегию жесткого, полугибкого, гибкого размещения.

Стратегия жёсткого размещения может быть применена, когда необходимо получить быстрое, но не самое производительное решение. При жестком размещении геометрия и внутренняя топология масштабируемых функциональных узлов не меняются. Например, такая стратегия может быть использована в локальных участках ПЛИС, когда коммутационный ресурс не позволяет плотно разместить функциональные узлы с большим количеством связей. Время разработки прикладной программы при выборе данной стратегии будет минимальным.

В отличие от предыдущей стратегии, стратегия полугибкого размещения позволяет более эффективно использовать ресурс ПЛИС за счёт ортогональных вращений функциональных узлов в пространстве примитивов ПЛИС и, соответственно, более плотного их размещения. Данная стратегия предполагает баланс между длительностью разработки и производительностью получаемого решения.

Стратегия гибкого размещения, в отличие от предыдущих, позволяет максимально задействовать ресурс ПЛИС для плотного размещения функциональных узлов и является наиболее затратной по времени. При такой стратегии размещения функциональные узлы могут подвергаться ортогональным вращениям, изменять свою геометрию и разделяться примитивами других типов или занятыми ячейками ПЛИС. Однако в ряде случаев применение данной стратегии может приводить к проблемам при трассировке, при высокой связности размещаемых функциональных узлов.

В конечном итоге разработчик решает, какую стратегию использовать для достижения конкретных целей.

Процедура размещения вычислительных структур на ПЛИС. На основе предложенного метода была разработана процедура размещения вычислительных структур на ПЛИС. Данную процедуру с применением указанных стратегий можно выполнять следующим образом:

1. Разработать схему размещения масштабируемого функционального узла.

Так как функциональный узел может занимать в общем случае произвольную область ПЛИС, то при разработке схемы его размещения учитывается совокупность тех же факторов, что и при разработке схемы размещения всей вычислительной структуры.

1.1. Для разработки схемы размещения функционального узла (вычислительной структуры) необходимо проанализировать архитектуру целевой ПЛИС.

1.2. Определить достаточную область для размещения функционального узла.

Необходимо проанализировать совокупность всех примитивов функционального узла на наличие прямых функциональных зависимостей между логическими примитивами и между специализированными примитивами, поскольку вывод вычислительной структуры на требуемые характеристики по производительности и тактовой частоте напрямую зависит от пространственной ориентации примитивов друг относительно друга.

1.3. Сформировать список путей к примитивам (иерархических имен примитивов) функционального узла.

1.4. Проанализировать выбранную область размещения на пересечение специальными областями ПЛИС (областями сопряжения кремниевых пластин, областями физических выводов, областями встроенных интерфейсов).

При наличии таких пересечений необходимо разместить составные части функционального узла таким образом, чтобы базовые арифметико-логические операции были неразрывными.

2. Разместить примитивы функционального узла в выбранной области путём создания набора топологических ограничений.

3. Выполнить компиляцию проекта, проверить его на работоспособность и достижение требуемых характеристик.

В случае выявления ошибки выполнить соответствующий анализ, внести корректировки и повторить цикл компиляции и проверки проекта.

4. Разработать схему размещения вычислительной структуры.

5. Определить границы области размещения вычислительной структуры.

6. Задать условия размещения в соответствии с выбранной стратегией размещения.

6.1. Если выбрана стратегия жёсткого размещения, установить запрет на ортогональные вращения функционального узла в пространстве примитивов ПЛИС, установить запрет на разделение функционального узла занятыми примитивами или примитивами других типов, установить запрет на изменение топологии функционального узла.

6.2. Если выбрана стратегия полугибкого размещения, установить разрешение на ортогональные вращения функционального узла в пространстве примитивов ПЛИС, установить запрет на разделение функционального узла занятыми примитивами или примитивами других типов, установить запрет на изменение топологии функционального узла.

6.3. Если выбрана стратегия гибкого размещения, установить разрешение на ортогональные вращения функционального узла в пространстве примитивов ПЛИС, установить разрешение на разделение функционального узла занятыми примитивами или примитивами других типов, установить разрешение на изменение топологии функционального узла.

7. Определить координаты оптимальных положений функциональных узлов.

Если ячейки, соответствующие полученным координатам, находятся в границах области размещения, не заняты и соответствуют типам примитивов исходного функционального узла, то пометить их занятыми, создать функциональный узел с полученными координатами и перейти к следующему функциональному узлу, в противном случае пересчитать координаты. Если все функциональные узлы размещены, зафиксировать топологические ограничения и перейти к следующему шагу.

8. Сохранить топологические ограничения в файле топологических ограничений.

9. Выполнить компиляцию проекта.

При успешной компиляции перейти к следующему шагу, в противном случае выполнить соответствующий анализ, внести корректировки и повторить цикл компиляции проекта.

10. Проверить проект на работоспособность и достижение целевых характеристик путём анализа отчётов САПР.

Если требуемые характеристики не достигнуты или выявлены ошибки, выполнить соответствующий анализ, внести корректировки и повторить цикл компиляции и проверки проекта.

Пример результата использования стратегии жёсткого размещения при синтезе фрагмента вычислительной структуры показан на рис. 7,а. Данный фрагмент вычислительной структуры строится на основе функционального узла, содержащего три примитива BRAM. Для простоты рассуждений ресурс CLB не показан.

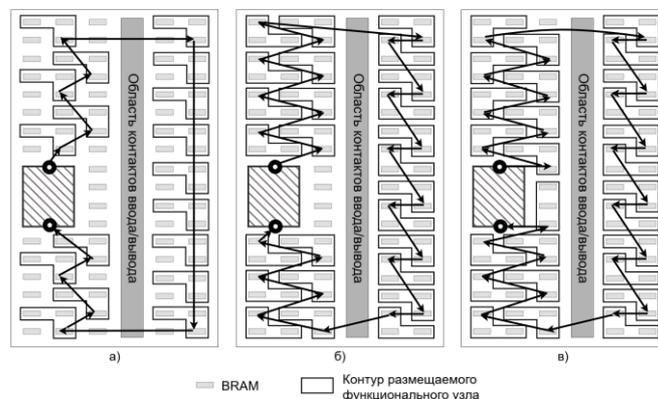


Рис. 7. Примеры результатов применения стратегий жёсткого размещения (а), полугибкого размещения (б) и гибкого размещения (в)

Производительность P при фиксированной тактовой частоте фрагмента вычислительной структуры, приведённого на рис. 7,а можно оценить по формуле

$$P = p \cdot N, \quad (4)$$

где p – производительность одного функционального узла, N – количество функциональных узлов.

Для данного примера $N = 18$, поэтому в соответствии с формулой (4) $P = 18p$.

Для анализа эффективности полученного решения необходимо оценить удельную производительность P_s по формуле

$$P_s = P/R_{all}, \quad (5)$$

где R_{all} – всего ресурса в области размещения.

В данном примере $R_{all} = 82$ ячейки, следовательно $P_s \approx 0,22 p$.

Время размещения вычислительной структуры t можно оценить по формуле

$$t = \varphi \cdot N \cdot \tau, \quad (6)$$

где φ – количество вариантов размещения функционального узла, N – количество функциональных узлов, τ – время размещения одного функционального узла.

Для данного примера $\varphi = 1$, в соответствии с формулой (6) $t = 18 \tau$.

Применение стратегии жёсткого размещения позволяет получать вычислительные структуры для различных задач с уровнем производительности не ниже 50% от пиковой за время, сопоставимое со временем синтеза, затрачиваемым САПР в автоматическом режиме. Данную стратегию целесообразно применять для оценки эффективности РВС при решении конкретной задачи предметной области либо в случае оперативного изменения алгоритма решения задачи. Однако стратегия жёсткого размещения не направлена на получение высокопроизводительных решений. Для того чтобы получать более производительные вычислительные структуры, следует применять стратегии полугибкого и гибкого размещения.

Пример результата использования стратегии полугибкого размещения при синтезе фрагмента вычислительной структуры показан на рис. 7,б.

Для данного примера $N = 26$, поэтому в соответствии с формулами (4) и (5) $P = 26p$, а $P_s \approx 0,317p$.

Стратегия полугибкого размещения предусматривает четыре варианта ориентации функционального узла в пространстве примитивов, следовательно $\varphi = 4$. Таким образом, в соответствии с формулой (6) для данного примера t может достигать 104τ .

Применение стратегии полугибкого размещения в большинстве случаев позволяет получать вычислительные структуры для эффективного решения большинства задач различных предметных областей с достаточным уровнем производительности.

Пример результата использования стратегии гибкого размещения при синтезе фрагмента вычислительной структуры показан на рис. 7,в.

Для данного примера $N = 27$, соответственно $P = 27p$, а $P_s \approx 0,329p$.

Для стратегии гибкого размещения φ можно оценить следующим образом:

$$\varphi = \frac{n!}{(n-m)!}, \quad (7)$$

где n – количество ячеек в границах размещения функционального узла, m – количество примитивов в функциональном узле.

Для данного примера $n = 4$, а $m = 3$, тогда в соответствии с формулами (6) и (7) t может достигать 648τ .

Стратегию гибкого размещения следует применять, когда необходимо получить максимально возможную производительность для данного класса (подкласса) задач. Однако недостатком данной стратегии является длительное время поиска оптимальной схемы размещения вычислительной структуры. Как было показано ранее, это связано с перебором различных вариантов размещения по композиции множества критериев.

Предложенный метод был испытан при синтезе вычислительных структур нескольких задач для реконфигурируемого компьютера «Tertius-2» производства «НИЦ СЭ и НК» (рис. 8) [21], содержащего восемь ПЛИС XCKU095.



Рис. 8. Реконфигурируемый компьютер «Tertius-2»

При построении вычислительных структур каждой из задач были задействованы все восемь ПЛИС реконфигурируемого компьютера, в каждой из которых были реализованы примерно равные по функциональной сложности и производительности фрагменты вычислительных структур.

В табл. 2 и 3 приводятся характеристики по удельной производительности и времени синтеза типового фрагмента вычислительной структуры каждой задачи для одной ПЛИС. Исследования эффективности предлагаемого метода проводились при условии, что разработку проекта ведёт один специалист на одном компьютере с одним центральным процессором без распараллеливания процессов проектирования. Естественно, проектом может заниматься коллектив разработчиков и компиляции различных вариантов проекта могут выполняться на нескольких процессорах, что ускорит разработку параллельно-конвейерных конвейерных программ для PBC. Однако предлагаемый метод способствует достижению качественного снижения временных затрат, особенно при создании прикладных программ для сложносоставных вычислительно трудоёмких задач.

В табл. 2 приведены достигаемые значения удельной производительности ПЛИС «Tertius-2» для задач на основе алгоритмов БПФ, AES и LU-разложения при автоматическом размещении вычислительных структур САПР Vivado и размещении с применением предложенного метода.

Удельная производительность ПЛИС рассчитывалась по формуле (5). Число системных логических ячеек (R_{all}) для ПЛИС XCKU095 составляет 1176000 SLC [17].

Таблица 2

Удельная производительность

Задача	САПР Vivado	Жёсткое размещение	Полугибкое размещение	Гибкое размещение
БПФ, kOps/SLC	275,77	451,6	569,71	634,28
AES, kVarps/SLC	4,49	7,43	9,44	10
LU, kFlops/SLC	14,45	39,85	50,08	55,27

Как показано в табл. 2, наибольшая удельная производительность достигается при использовании стратегий полугибкого и гибкого размещения предложенного метода. В тоже время удельная производительность, достигаемая стандартными автоматическими средствами размещения САПР без применения топологических ограничений, в лучшем случае меньше возможной на 55%. Безусловно, время синтеза в этом случае будет минимальным, но в контексте максимизации производительности PBC при решении задач, такие параллельно-конвейерные программы не актуальны.

Проведенные исследования показали, что время синтеза параллельно-конвейерной программы пропорционально зависит от целевой производительности, особенно при ручном формировании схемы размещения, что обусловлено наличием ошибок, связан-

ных с человеческим фактором. В табл. 3 приведены показатели времени синтеза (в долях суток) параллельно-конвейерных программ для рассматриваемых задач при размещении вычислительных структур на ПЛИС с применением предложенной процедуры в ручном (Р) режиме формирования топологических ограничений и автоматизированном (А).

Таблица 3

Время синтеза параллельно-конвейерных программ

Задача	Жёсткое размещение		Полугибкое размещение		Гибкое размещение	
	Р	А	Р	А	Р	А
БПФ	3,39	1,25	13,56	5,1	27,12	10,2
AES	3,02	1,23	12,08	4,92	24,16	9,84
LU	4,05	1,45	16,2	5,8	32,4	11,6

Предложенная процедура размещения вычислительных структур на ПЛИС позволяет сократить время разработки эффективных прикладных программ для РВС в 2-3 раза. Кроме того, применение различных стратегий размещения в разработанной процедуре позволяет синтезировать в САПР параллельно-конвейерные программы, при исполнении которых реальная производительность РВС в 1,65 и более раз выше, чем при исполнении программ, синтезированных в автоматическом режиме компиляции САПР.

Заключение. Результаты исследований показали, что применение в рамках предложенной процедуры эвристических правил формирования схем размещения, свойственных классам решаемых задач, а также автоматизация процесса формирования топологических ограничений позволила значительно сократить время синтеза высокопроизводительных параллельно-конвейерных программ. Следует отметить, что в дальнейшем возможно ещё больше сократить время синтеза, если автоматизировать сам процесс разработки схем размещения.

В настоящее время ведётся разработка программы препроцессора «ТС-Creator», предназначенного для генерации в автоматизированном режиме файлов топологических ограничений. Применение данного препроцессора позволяет полностью исключить влияние человеческого фактора. Также развиваются эвристические алгоритмы разработки схем размещения вычислительных структур на поле ПЛИС, дальнейшее внедрение которых в «ТС-Creator» позволит еще больше повысить автоматизацию синтеза вычислительных структур и сократить время разработки высокопроизводительных параллельно-конвейерных программ для РВС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каляев И.А., Дордопуло А.И., Левин И.И., Федоров А.М.* Развитие отечественных многокристалльных реконфигурируемых вычислительных систем: от воздушного к жидкостному охлаждению // Тр. СПИИРАН. – СПб.: Изд-во СПИИРАН ФГБУН Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН. – 2017. – № 1 (50). – С. 5-31. – DOI: 10.15622/sp.50.1.
2. *Каляев А.В., Левин И.И.* Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. – М.: Янус-К, 2003. – 380 с.
3. *Каляев И.А., Левин И.И.* Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2022. – 506 с. – ISBN 978-5-4358-0232-0.
4. Vivado Overview. – URL: <https://www.amd.com/en/products/software/adaptive-socs-and-fpgas/vivado.html> (дата обращения: 08.11.2024).
5. FPGA Design Software – Quartus Prime. – URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/fpga/development-tools/quartus-prime.html> (дата обращения: 08.11.2024).
6. *Алексеев К.Н., Сорокин Д.А., Леонтьев А.Л.* Методика создания топологических ограничений при высокой утилизации ресурсов ПЛИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 4. – С. 200-212.
7. *Диченко А.А., Сорокин Д.А., Левин И.И.* Принципы размещения вычислительных структур на ПЛИС реконфигурируемых вычислительных систем // Deutsche Internationale Zeitschrift für Zeitgenössische Wissenschaft. – 2024. – № 79. – С. 54-63. – DOI: 10.5281/zenodo.11127391. – EDN TBKWEJ.

8. *Алексеев К.Н., Сорокин Д.А.* Оптимизация вычислительных структур под архитектуру ПЛИС XILINX // *FPGA-Systems Magazine: FSM: № ALFA (state_0)*. – 2023. – 166 с. – С. 75-82. – URL: https://fpga-systems.ru/fs_fsm/state_0/fsm_state_0.pdf (дата обращения: 17.09.2024).
9. *Vivado Design Suite User Guide: Using Constraints (UG903)*. – URL: <https://docs.amd.com/r/en-US/ug903-vivado-using-constraints> (дата обращения: 20.11.2024).
10. *Vivado Design Suite User Guide: Design Analysis and Closure Techniques (UG906)*. – URL: <https://docs.amd.com/r/en-US/ug906-vivado-design-analysis> (дата обращения: 20.11.2024).
11. *Intel Quartus Prime Standard Edition User Guide: Design Constraints*. – URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/programmable/683492/18-1/constraining-designs.html> (дата обращения: 21.11.2024).
12. *Speed Grade*. – URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/programmable/683703/17-1/speed-grade.html> (дата обращения: 03.12.2024).
13. *Xilinx WP380 Xilinx Stacked Silicon Interconnect Technology Delivers Breakthrough FPGA Capacity, Bandwidth, and Power Efficiency (WP380)*. – URL: https://docs.amd.com/v/u/en-US/wp380_Stacked_Silicon_Interconnect_Technology (дата обращения: 03.12.2024).
14. *Virtex-6 Family Overview (DS150)*. – URL: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds150> (дата обращения: 10.12.2024).
15. *Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Дордопуло А.И.* Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС семейства Virtex-6 // *Параллельные вычислительные технологии (ПавТ2011): Тр. международной научной конференции, Москва, 28 марта – 01 2011 года / отв. за выпуск: Л.Б. Соколинский, К.С. Пан.* – М.: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 203-210. – EDN TBLWND.
16. *7 Series FPGAs Data Sheet: Overview (DS180)*. – URL: https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds180_7Series_Overview (дата обращения: 10.12.2024).
17. *UltraScale Architecture and Product Data Sheet: Overview (DS890)*. – URL: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds890-ultrascale-overview> (дата обращения: 10.12.2024).
18. *Versal Architecture and Product Data Sheet: Overview (DS950)*. – URL: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds950-versal-overview> (дата обращения: 11.12.2024).
19. *Vivado Design Suite (WP416)*. – URL: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/wp416-Vivado-Design-Suite> (дата обращения: 10.12.2024).
20. *Defining Implementation Strategies • Vivado Design Suite User Guide: Implementation (UG904)*. – URL: <https://docs.amd.com/r/en-US/ug904-vivado-implementation/Defining-Implementation-Strategies> (дата обращения: 10.12.2024).
21. *Терциус-2 | НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров*. – URL: <https://superevm.ru/index.php?page=tertsius-2> (дата обращения: 14.01.2025).

REFERENCES

1. *Kalyaev I.A., Dordopulo A.I., Levin I.I., Fedorov A.M.* Razvitie otechestvennykh mnogokristal'nykh rekonfiguriruemyykh vychislitel'nykh sistem: ot vozdušnogo k zhidkostnomu okhlazhdeniyu [Development of domestic multi-crystal reconfigurable computing systems: from air to liquid cooling], *Tr. SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS]. St. Petersburg: Izd-vo SPIIRAN FGBUN Sankt-Peterburgskiy institut informatiki i avtomatizatsii RAN, 2017, No. 1 (50), pp. 5-31. DOI: 10.15622/sp.50.1.
2. *Kalyaev A.V., Levin I.I.* Modul'no-narashchivaemye mnogoprotsessornyye sistemy so strukturno-protsedurnoy organizatsiyey vychisleniy [Modularly scalable multiprocessor systems with structural-procedural organization of computations]. Moscow: Yanus-K, 2003, 380 p.
3. *Kalyaev I.A., Levin I.I.* Rekonfiguriruemyye vychislitel'nyye sistemy na osnove PLIS [Reconfigurable computing systems based on FPGAs]. Rostov-on-Donu: Izd-vo YuNTS RAN, 2022, 506 p. ISBN 978-5-4358-0232-0.
4. *Vivado Overview*. Available at: <https://www.amd.com/en/products/software/adaptive-socs-and-fpgas/vivado.html> (accessed 08 November 2024).
5. *FPGA Design Software – Quartus Prime*. Available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/fpga/development-tools/quartus-prime.html> (accessed 08 November 2024).
6. *Alekseev K.N., Sorokin D.A., Leont'ev A.L.* Metodika sozdaniya topologicheskikh ogranicheniy pri vysokoy utilizatsii resursov PLIS [Methodology for creating topological constraints with high utilization of FPGA resources], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4, pp. 200-212.
7. *Dichenko A.A., Sorokin D.A., Levin I.I.* Printsipy razmeshcheniya vychislitel'nykh struktur na PLIS rekonfiguriruemyykh vychislitel'nykh sistem [Principles of placing computing structures on FPGAs of reconfigurable computing systems], *Deutsche Internationale Zeitschrift für Zeitgenössische Wissenschaft*, 2024, No. 79, pp. 54-63. DOI: 10.5281/zenodo.11127391. EDN TBKWEJ.

8. *Alekseev K.N., Sorokin D.A.* Optimizatsiya vychislitel'nykh struktur pod arkhitekturu PLIS XILINX [Optimization of computing structures for the XILINX FPGA architecture], *FPGA-Systems Magazine: FSM: № ALFA (state_0)*, 2023, 166 p., pp. 75-82. Available at: https://fpga-systems.ru/fs_fsm/state_0/fsm_state_0.pdf (accessed 17 September 2024).
9. Vivado Design Suite User Guide: Using Constraints (UG903). Available at: <https://docs.amd.com/r/en-US/ug903-vivado-using-constraints> (accessed 20 November 2024).
10. Vivado Design Suite User Guide: Design Analysis and Closure Techniques (UG906). Available at: <https://docs.amd.com/r/en-US/ug906-vivado-design-analysis> (accessed 20 November 2024).
11. Intel Quartus Prime Standard Edition User Guide: Design Constraints. Available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/programmable/683492/18-1/constraining-designs.html> (accessed 21 November 2024).
12. Speed Grade. Available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/programmable/683703/17-1/speed-grade.html> (accessed 03 December 2024).
13. Xilinx WP380 Xilinx Stacked Silicon Interconnect Technology Delivers Breakthrough FPGA Capacity, Bandwidth, and Power Efficiency (WP380). Available at: https://docs.amd.com/v/u/en-US/wp380_Stacked_Silicon_Interconnect_Technology (accessed 03 December 2024).
14. Virtex-6 Family Overview (DS150). Available at: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds150> (accessed 10 December 2024).
15. *Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A., Dordopulo A.I.* Rekonfiguriruyemye vychislitel'nye sistemy na osnove PLIS semeystva Virtex-6 [Reconfigurable computing systems based on FPGAs of the Virtex-6 family], *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PaVT'2011): Tr. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Moskva, 28 marta – 01 2011 goda* [Proceedings of the international scientific conference, Moscow, March 28 – January 2011], Responsible for the release: L.B. Sokolinskiy, K.S. Pan. Moscow: Izdatel'skiy tsentr YuUrGU, 2011, pp. 203-210. EDN TBLWND.
16. 7 Series FPGAs Data Sheet: Overview (DS180). Available at: https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds180_7Series_Overview (accessed 10 December 2024).
17. UltraScale Architecture and Product Data Sheet: Overview (DS890). Available at: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds890-ultrascale-overview> (accessed 10 December 2024).
18. Versal Architecture and Product Data Sheet: Overview (DS950). Available at: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds950-versal-overview> (accessed 11 December 2024).
19. Vivado Design Suite (WP416). Available at: <https://docs.amd.com/v/u/en-US/wp416-Vivado-Design-Suite> (accessed 10 December 2024).
20. Defining Implementation Strategies • Vivado Design Suite User Guide: Implementation (UG904). Available at: <https://docs.amd.com/r/en-US/ug904-vivado-implementation/Defining-Implementation-Strategies> (accessed 10 December 2024).
21. Tertsius-2 | NITS super-EVM i neyrokomp'yuteroi [Tertsius-2 | Research Center of Supercomputers and Neurocomputers]. Available at: <https://superevm.ru/index.php?page=tertsius-2> (accessed 14 January 2025).

Диченко Алексей Андреевич – Южный федеральный университет; e-mail: dichenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79525724918; кафедра интеллектуальных и многопроцессорных систем; аспирант.

Левин Илья Израилевич – Южный федеральный университет; e-mail: iilevin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634361608; зав. кафедрой интеллектуальных и многопроцессорных систем; д.т.н.; профессор.

Сорокин Дмитрий Анатольевич – ООО «НИЦ СЭ и НК»; e-mail: jotun@inbox.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79508668253; начальник отдела прикладного программного обеспечения; к.т.н.

Dichenko Aleksey Andreevich – Southern Federal University; e-mail: dichenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525724918; the Department of Intelligent and Multiprocessor Systems; postgraduate student.

Levin Ilya Izrailevich – Southern Federal University; e-mail: levin@superevm.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634361608; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Sorokin Dmitry Anatolyevich – Supercomputers and Neurocomputers Research Center; e-mail: jotun@inbox.ru; Taganrog, Russia; phone: +79508668253; chief of department; cand. of eng. sc.

Раздел II. Анализ данных, моделирование и управление

УДК 681.142

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-47-58

А.А. Белевцев, А.М. Белевцев, В.А. Бальбердин

АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ ПРИОРИТЕТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ В УСЛОВИЯХ СВЯЗНОСТИ КРИТЕРИЕВ И ТЕХНОЛОГИЙ

В настоящее время значительное внимание в развитых зарубежных странах уделяется вопросам развития и использования в военной сфере концепции сетецентрического управления (СЦУ). Концепция определяет архитектуру системы проведения операций в виде взаимоувязанных в единую систему трёх видов сетевых структур: разведки и наблюдения, информационно-управляющей, средств поражения. Анализ показывает, что существенную роль в сетевой структуре разведки и наблюдения (называемой также сенсорной решеткой) играют радиолокационные системы и комплексы (РЛК). Отмечается, что в настоящее время значительные усилия предпринимаются в целях разработки качественно нового поколения РЛС на базе исследований по созданию новых технологий в таких областях, как наноэлектроника, микро- и наноэлектромеханическая техника (MEMS/NEMS), наносистемы, функциональные материалы и наноматериалы, построение больших информационных коммуникационных сетей. В этой связи вопросы прогнозирования направлений развития новых технологий создания перспективных радиолокационных систем и комплексов военного назначения приобретают существенный интерес. Рассматриваются вопросы повышения достоверности оценок при анализе технологических трендов и технологий на примере развития радиолокационных комплексов (РЛК) для систем СЦУ. В работе предложена процедура формирования иерархической системы критериев, проведен поэтапный анализ векторов приоритетов на примере создания и развития технологических трендов и технологий радиолокационной составляющей сенсорной решетки СЦУ. Было показано, что наличие взаимосвязей критериев и обратных связей в анализируемых технологических трендах приводит к существенным ошибкам: в определении значений векторов приоритетов и построении дорожных карт создания радиолокационной составляющей сенсорной решетки СЦУ. В результате установлено, что для повышения достоверности прогнозирования необходимо проводить оценку приоритетов в общей схеме развития технологических трендов и технологий на основе метода аналитических сетей.

Сетецентрическое управление; прогнозирование; сенсорная решетка; радиолокационные средства; технологические направления; метод анализа иерархий; метод аналитических сетей.

A.A. Belevtsev, A.M. Belevtsev, V.A. Balyberdin

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING BIG LANGUAGE MODELS FOR MONITORING TECHNOLOGICAL TRENDS AND DETERMINING DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF HIGH-TECH ENTERPRISES

In modern times some foreign countries pay a great attention at the development and using in military field the netcentric conception of control (NCC). The conception defines the architecture of operations as a composition of three network structures: reconnaissance, information control and destruction. The analyses made show that the great part in the network structure of reconnaissance play the radar systems and complexes (RSC). It is pointed out that at present the great efforts are made to realize a new quality RSC on the base of new technologies in nanoelectronics, MEMS/NEMS, nanomaterials, large information networks. That is why the predictions for ways to new technologies constructing of perspective RSC for military objectives is of great interest. The paper deals with some problems connected to the estimations certainty when technological trends and technologies are analyzed. The study is made on the example of radar complexes (RC) in NSS. The procedure for hierarchy criterions system forming is suggested, the bystages priority vector analyses are made on the example of technological trends and technologies developments for sensor greed of NSS. It has been known that the availability of the criterions

interrelations reciprocal of the technological trends can made errors for estimations constructed: in vectors priorities estimations; in roadcars constructing for radar part of NSS. It is recognized that to raise the certainty requires the priorities estimation in the common schematic for technological trends and technologies on the base of analytical networks method.

Netcentric conception of control; sensor greed; forecast; radar systems and complexes; technological trends; hierarchy analyses method; analytical networks method.

Введение. В настоящее время значительное внимание в развитых зарубежных странах уделяется вопросам развития и использования в военной сфере концепции сетевенческого управления (СЦУ) [1–5]. Концепция определяет архитектуру системы проведения операций в виде взаимоувязанных в единую систему трёх видов сетевых структур: разведки и наблюдения, информационно-управляющей, средств поражения.

Анализ показывает, что существенную роль в сетевой структуре разведки и наблюдения (называемой также сенсорной решеткой) играют радиолокационные системы и комплексы (РЛК) [6–10].

В настоящее время в рамках перехода к шестому технологическому укладу значительные усилия в научно-техническом плане предпринимаются в целях разработки качественно нового поколения РЛК на базе исследований по созданию нового поколения технологий в таких областях, как:

- ◆ наноэлектроника;
- ◆ микро- и наноэлектромеханическая техника (MEMS/NEMS);
- ◆ наносистемы и функциональные материалы и наноматериалы;
- ◆ построение больших информационных коммуникационных сетей – глобального информационного пространства и др.

В этой связи вопросы стратегического анализа направлений развития новых технологий создания перспективных радиолокационных систем и комплексов военного назначения приобретают существенный интерес.

Основная часть

1. Постановка задачи

Одной из основных проблем решения этой задачи является оценка приоритетов, которая обусловлена сложностью получения количественных оценок, взаимозависимостью критериев и наличием обратных связей в анализируемых структурах технологических трендов.

Решение задачи повышения достоверности оценки требует создания и развития новых подходов и методов, которые должны обеспечить:

- ◆ учет взаимной зависимости критериев и наличие обратных связей в анализируемых структурах технологических трендов;
- ◆ получение более корректных оценок согласованности рассматриваемых элементарных оценок, что позволит повысить достоверность интегральных оценок прогноза приоритетов технологических трендов.

2. Критерии решения задачи

Для заданного уровня анализа, необходимо учитывать общемировые тенденции развития экономики, которое характеризуются резким обострением конкуренции и борьбой за технологический суверенитет. В этой связи для решения поставленной задачи необходимо определение:

- ◆ технологических трендов объективного развития технологий в предметных областях и группах предметных областей;

а так же:

- ◆ технологических трендов развития науки и технологий, сформированных в рамках противодействия внешним угрозам на национальном уровне.

В этой связи для решения задачи необходима разработка трех групп критериев оценки приоритетов [6, 11].

В первую группу $K1(U_i)$ войдет перечень критериев, сформированных на основе анализа угроз безопасности.

Первая группа критериев может быть сформирована на основе перечня угроз, которые вошли в военную доктрину РФ [12]:

- ◆ Угроза 1: Конфликт со страной, превосходящей Россию по уровню технологий. Война бесконтактным способом.
- ◆ Угроза 2: Конфликт с равной по потенциалу страной.
- ◆ Угроза 3: Локальные войны наподобие Афганистана и Сирии.
- ◆ Угроза 4: Противостояние терроризму.
- ◆ Угроза 5: Возможное обострение борьбы за ресурсы Арктики.

Во вторую группу $K2(C_n^{Pm})$, где $n = \overline{1, N}$ – номера технологических трендов, войдет иерархическая система критериев для построения оценок на уровне технологических трендов.

Методические рекомендации по оформлению второй группы критериев рассмотрены в работе [1, 7].

Для оценки технологических направлений и технических систем (ТС) нового поколения целесообразно вводить следующие характеристики критериев [11, 9]:

- ◆ функциональные (тактические);
- ◆ технико-экономические.

Тактические характеристики определяют возможности целевого применения и области применения.

Технические характеристики определяют технические (технологические) средства, необходимые для обеспечения тактических параметров.

К технико-экономическим характеристикам следует отнести:

- ◆ масса-габаритные характеристики;
- ◆ характеристики энергопотребления;
- ◆ надежность;
- ◆ стоимость.

В третью группу $K3(c_{ij}^n)$, где $i = \overline{1, I}$ – войдет система критериев для оценки приоритетов технологий c_{ij}^n технологического тренда C_n^{Pm} , на уровне отдельных технологий.

При этом в качестве критерия может быть выбран критерий $K3(c_{ij}^n)$ – какая из сравниваемых технологий наиболее значима для реализации тренда.

3. Последовательность этапов решения задачи.

Решение поставленной задачи может быть получено на основе реализации процедуры, представленной в виде следующего уравнения логического вывода (1)

$$\begin{array}{ccccccc}
 O_i \rightarrow O_k (O_k \in O_i) \rightarrow P \rightarrow P_m(\max \rho_k^P) \rightarrow G_n^{Pm} \rightarrow \bar{\rho}_n^{Pm}(\bar{\rho}_n^{Pm}(\Phi K), \bar{\rho}_n^{Pm}(TЭ)) \rightarrow G_i^n \rightarrow \bar{\rho}_{ij}^{Pm}(c_{ij}^n) & & & & & & (1) \\
 \uparrow & \uparrow & \uparrow & & \uparrow & & \\
 K_1(y_i) & K_1(y_i) & K_2 & & K_3 & &
 \end{array}$$

где O_i – область применения (СЦУ);

O_k – РЛК сегмент области применения O_i (сенсорная решетка) $O_k \in O_i$;

P – группа предметных областей для сегмента O_k (РЛК);

$\rho_k^P = \{\rho_1 \dots \rho_k\}$ – вектор приоритетов для группы предметных областей $P \in O_k$;

$P_m(\max \rho_k^P)$ – предметная область с максимальным значением вектора приоритетов по критерию K_1 ;

$\bar{\rho}_n^{Pm}(\bar{\rho}_n^{Pm}(\Phi K) \cup \bar{\rho}_n^{Pm}(TЭ))$ – вектор приоритетов технологических трендов по критерию K_2 ;

C_n^{Pm} – технологические тренды предметной области P_m (БПЛА);

$G_n^{Pm} = \{c_{ij}^n\}$ – логический граф технологий тренда C_n^{Pm} предметной области P_m ;

$\{c_{ij}^n\}$ – технологии технологического тренда C_n^{Pm} ;

$\bar{\rho}_{ij}^{Pm}(c_{ij}^n)$ – вектор приоритетов технологий технологического тренда C_n^{Pm} для P_m по критерию K_3 .

На первом этапе.

В соответствии с уравнением (1) и группой критериев $K1(Y_i)$ осуществляется логический переход от O_i – область применения (СЦУ) к P – группа предметных областей для сегмента O_k .

На втором этапе.

На основании проведенного мониторинга сформировано множество направлений – P создания РЛК для БПЛА различных вариантов базирования, как сегмента O_k сенсорной решетки O_i СЦУ:

1. Космическое базирование.
2. Псевдоспутники – стратосферные беспилотные летательные аппараты (БПЛА).
3. Воздушное базирование.
4. Мобильные системы.
5. Операции в городских условиях.
6. Наземное базирование.

Можно положить, что в сформированной группе критериев $K1(Y_i)$ все угрозы независимы. Тогда оценка интегральных значений вектора приоритетов для сегментов сенсорной решетки РЛК может быть получена на основе МАИ [11, 13, 14]. Результаты представлены на рис. 1.

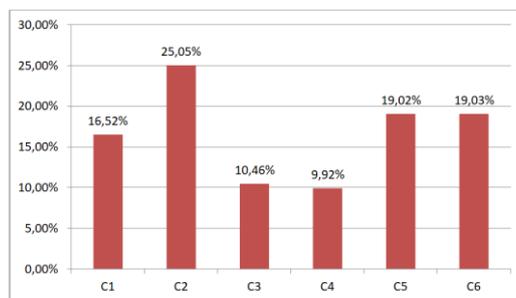


Рис. 1. Результаты анализа приоритетных направлений развития сегментов сенсорной решетки РЛК

На основании полученных результатов $P_m(\max \rho_k^P)$ – максимальное значение вектора приоритетов получено для 5-го сегмента сенсорной решетки т.е. псевдоспутники или стратосферные БПЛА [12, 15–24].

Ключевое преимущество псевдо-спутников в том, что они берут лучшее от направлений 3 и 1:

- ◆ гибкость самолета (включая беспилотные дроны);
- ◆ надежность спутниковых систем.

Вместе с тем создание РЛК для данного сегмента требует нового технологического базиса в целях обеспечения высоких требований к массогабаритным характеристикам, высокой разрешающей способности, системе энергоснабжения и другим характеристикам.

На третьем этапе.

На основании проведенного мониторинга для предметной области $P_m(\max \rho_k^P)$ – с максимальным значением вектора приоритетов сформированы пять технологических трендов C_n^{Pm} , для которых определены технологии C_j^n табл. 1.

C_1^{Pm} – технологии создания многофункциональных композиционных наноматериалов.

C_2^{Pm} – технологии управления теплом.

C_3^{Pm} – технологии создания быстродействующей компонентной базы.

C_4^{Pm} – технологии генерации и хранения энергии.

C_5^{Pm} – технологии интеграции СВЧ электронных компонентов.

В соответствии с уравнением логического вывода (1) проводим структуризацию технологических трендов. Логический граф G_n^{Pm} для рассматриваемого варианта представлен на рис. 2.

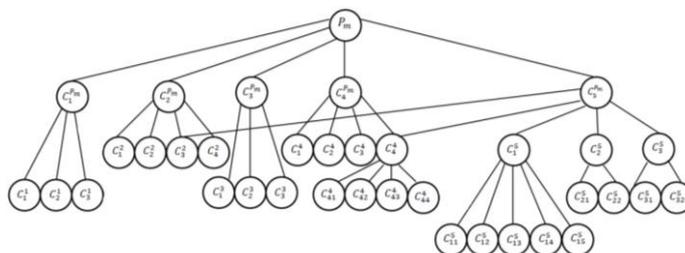


Рис. 2. Логический граф $G_n^{P_m}$ технологических трендов и технологий

Таблица 1

Приоритеты технологии c_{ij}^n тренда $C_n^{P_m}$ предметной области P_m .

		Наименование технологии	$\bar{P}_n^{P_m}(\Phi K)$	$\bar{P}_n^{P_m}(TЭ)$	
			$\rho_{ij}^{P_m}$	$\rho_{ij}^{P_m}$	
$C_1^{P_m}$	C_1^1	Технологии создания радиочастотных наноматериалов	0,005	0,011	
	C_2^1	Технологии создания размеростабильных композиционных наноматериалов УНТ	0,034	0,075	
	C_3^1	Технологии создания метоматериалов	0,011	0,024	
$C_2^{P_m}$	C_1^2	Теплоконтроль в кристалле	0,028	0,021	
	C_2^2	Теплоотвод с чипа	0,018	0,013	
	C_3^2	Теплоотвод со схемы	0,065	0,49	
	C_4^2	Теплоотвод с узла	0,009	0,007	
$C_3^{P_m}$	C_1^3	Материалы для генерации и хранения энергии	0,120	0,092	
	C_2^3	Портативные источники питания	0,098	0,075	
	C_3^3	Системы накопления энергии на МЭМС	0,042	0,032	
$C_4^{P_m}$	C_1^4	Быстродействующие логические элементы МЭМС	0,018	0,010	
	C_2^4	Быстродействующие элементы на полимерах	0,010	0,005	
	C_3^4	Микроплазменные устройства	0,018	0,010	
	C_4^4	Технологии нанофотоники и графена			
	C_4^4	C_{41}^4	Нанопроволки, нанопровода, фуллерены для создания компонентной базы	0,036	0,019
		C_{42}^4	Технологии быстродействующих ИС и логических элементов с УНТ	0,047	0,025
		C_{43}^4	Кремневая нанофотоника	0,073	0,037
		C_{44}^4	Технологии быстродействующей компонентной базы на основе графена	0,107	0,055
$C_5^{P_m}$	C_1^5	Технологии микро и нанопроцессоров			
	C_1^5	C_{11}^5	Процессоры на графеновых транзисторах	0,026	0,044
		C_{12}^5	Процессоры на алмазных транзисторах	0,06	0,009
		C_{13}^5	Процессоры на графене и нитриде бора	0,012	0,020
		C_{14}^5	Процессоры НЭМС	0,06	0,009
		C_{15}^5	Процессоры с фотонной обработкой	0,027	0,044
	C_2^5	СВЧ МЕМС/НЕМС			
	C_2^5	C_{21}^5	Технологии СВЧ МЕМС компонентов	0,020	0,033
		C_{22}^5	Технологии СВЧ НЕМС компонентов	0,081	0,134
	C_3^5	Технологии монолитных интегральных схем			
	C_3^5	C_{31}^5	Технологии GaN	0,025	0,042
C_{32}^5		Технологии GaAs	0,006	0,010	

Отметим, что сформированный логический граф $G_n^{P_m}$ (рис. 2) является связанным. Четвертый этап.

Формируем группу критериев K_2 для оценки приоритетов технологических трендов $C_n^{P_m}$ предметной области P_m

С учетом специфики предметной области и рекомендаций [11, 15, 16] можно представить систему критериев K_2 в следующем виде (рис. 3).

$K_2(\text{ФК})$ – Функциональные критерии:

ФК1 – Зона обзора РЛК;

ФК2 – Разрешающая способность РЛК;

ФК3 – Точность измерения координат и параметров объектов;

ФК4 – Помехозащищенность РЛК;

ФК5 – Пропускная способность РЛК.

$K_2(\text{ТЭ})$ – Техничко-экономические критерии:

ТЭ1 – Массо-габаритные характеристики;

ТЭ2 – Энергопотребление;

ТЭ3 – Надёжность;

ТЭ4 – Стоимость.

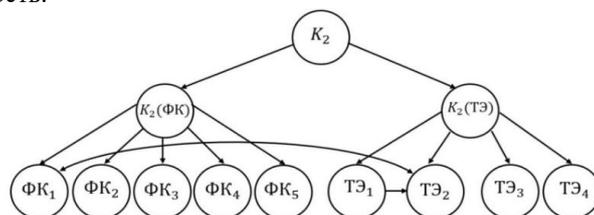


Рис. 3 Структура системы критериев K_2

Структура системы критериев K_2 так же является связанной (рис 3.).

Это обусловлено наличием взаимосвязи энергопотребления с массогабаритными характеристиками и зоной обзора.

Таким образом в результате выполнения 4 этапа получили связанную систему критериев K_2 и связанный логический граф технологий G_n^{Pm}

Поэтому решение данной задачи в общем случае следует рассматривать в сетевом варианте на основе МАС [9, 10, 14,15].

Пятый этап – оценка приоритетов технологических трендов $\bar{\rho}_n^{Pm}$

Для каждого типа критериев (функциональные, технико-экономические) суперматрицу W можно представить в следующем виде [14]

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & | \\ X & Y & 0 & \\ 0 & Z & I & \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где X – вектор приоритетов критериев относительно цели. Y – матрица собственных векторов, характеризующих зависимости между критериями. Z – матрица собственных векторов приоритетов альтернатив относительно критериев. I – единичная матрица.

Возведение суперматрицы W в степени дает в предельном случае требуемое решение $W(pr)$ в следующем виде [14]:

$$W(pr) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ Z(I-Y)^{-1}X & Z(I-Y)^{-1} & I \end{bmatrix} \quad (3)$$

Таким образом, вычислительная процедура сводится к построению вектора X и матриц X , Z [9, 23] (на основе методологии МАИ) для каждой группы критериев и последующему вычислению предела суперматрицы W [14]. Искомый вектор весов альтернатив с учетом рассмотренных типов зависимостей определяется как компонент предельной суперматрицы W (pr) в левом нижнем углу предельной матрицы.

Рассмотрим практическую реализацию предложенной процедуры.

Для системы критериев K2 (рис. 3) в соответствии с общей методикой [25] по методологии МАИ [13] проводим оценку числовых значения соответствующих нормированных собственных векторов (векторов приоритетов), необходимых для формирования компонентов суперматрицы. Полученные значения векторов приоритетов, соответственно, функциональных и технико-экономических критериев относительно цели представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Оценка вектора приоритетов функциональных критериев.

Вектор приоритетов	Зона обзора	Разрешающая способность	Точность измерения	Помехозащитность	Пропускная способность
K2(ФК)	0.076	0.247	0.499	0.038	0.140

Таблица 3

Оценка вектора приоритетов технико-экономических критериев.

Вектор приоритетов	Массогабариты	Энергопотребление	Надёжность	Стоимость
K2(ТЭ)	0.110	0.434	0.414	0.042

При построении обратносимметричных матриц, для вычисления векторов приоритетов, представленных в табл. 2 и 3 в качестве ключевого, формулировался следующий вопрос: какой из каждой пары критериев в большей степени влияет на боевые возможности псевдоорбитальных спутников (БПЛА).

В табл. 4 и 5 приведены матрицы собственных векторов приоритетов альтернатив C_n^{Pm} (технологических трендов) относительно функциональных и технико-экономических критериев.

Соответствующие обратносимметричные матрицы строились для следующего ключевого вопроса: – какое из двух технологических направлений в большей степени обеспечивает удовлетворение этого критерия.

Таблица 4

Матрица приоритетов технологических трендов относительно функциональных критериев

$\bar{M}_n^{Pm}[K2(ФК)]$	Зона обзора	Разрешающ. способность	Точность	Помехозащитность	Пропускная способность
Схемная интеграция	0.149	0.160	0.414	0.131	0.248
Быстродейств. комп. база	0.427	0.234	0.262	0.265	0.450
Энергообеспечение	0.294	0.478	0.097	0.454	0.107
Управление теплом	0.082	0.079	0.169	0.082	0.151
Функ. композ. материалы	0.048	0.049	0.058	0.068	0.044

Таблица 5

Матрица приоритетов технологических трендов относительно технико-экономических критериев.

$\bar{M}_n^{Pm}[K2(ТЭ)]$	Массогабариты	Энергопотребление	Надёжность	Стоимость
Схемная интеграция	0.454	0.427	0.397	0.448
Быстродейств. комп. база	0.049	0.166	0.302	0.149
Энергообеспечение	0.152	0.274	0.162	0.272
Управление теплом	0.096	0.087	0.093	0.052
Функ. композ. материалы	0.249	0.046	0.046	0.079

Результаты оценки взаимной зависимости, соответственно, функциональных и технико-экономических критериев представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 6

Оценка взаимного влияния функциональных критериев

К2(ФК)	Зона обзора	Разрешающ. способность	Точность	Помехозащищенность	Пропускная способность
Зона обзора	0	0.547	0.682	0	0.122
Разрешающ. способность	0.403	0	0.236	0.200	0.558
Точность	0.443	0.345	0	0.800	0.320
Помехозащищенность	0	0.108	0.82	0	0
Пропускная способность	0.154	0	0	0	0

Таблица 7

Оценка взаимного влияния технико-экономических критериев

К2(ТЭ)	Массогабариты	Энергопотребление	Надёжность	Стоимость
Массогабариты	0	0.80	0.627	0.604
Энергопотребление	0.280	0	0.280	0.291
Надёжность	0.627	0.20	0	0.105
Стоимость	0.093	0	0.093	0

При построении обратносимметричных матриц для вычисления векторов приоритетов табл. 6, 7 формулировался ключевой вопрос: какой из двух сравниваемых критериев оказывает наибольшее влияние на обеспечение требований группы критериев?

В результате проведенных расчетов (табл. 1–6) формированы исходные данные, необходимые для построения суперматриц W .

При этом придерживаясь схемы обозначений, представленной в суперматрице, отметим следующее.

Значения вектора X определяют таблицы 1 и 2, а значения матрицы Z – табл. 3 и 4 – приоритеты альтернатив (технологических направлений), соответственно, для функциональных и технико-экономических критериев. Значения матрицы Y – в табл. 5, 6 (соответственно для функциональных и технологических критериев).

Проведем необходимые расчеты с построенными суперматрицами.

При этом значения:

X – $\bar{\rho}_n^{Pm}(\text{ФК}), \bar{\rho}_n^{Pm}(\text{ФЭ})$ – вектор приоритетов критериев относительно цели (табл. 2 и 3).

Z – $\bar{M}_n^{Pm}[K2(\text{ФК})], \bar{M}_n^{Pm}[K2(\text{ТЭ})]$ матрицы векторов приоритетов технологических трендов относительно группы критериев $K2$ (табл. 3, 4).

Y – $K2(\text{ФК}), K2(\text{ТЭ})$ матрица влияния между группами критериев (табл. 5 и 6).

Полученные результаты обеспечивают возможность проведения сравнительного анализа оценок приоритетов технологических трендов $\bar{\rho}_n^{Pm}(K^*2)$ учетом связности критериев.

Анализ и оценка приоритетов технологий логического графа G_n^{Pm} (рис.) в случае большой размерности и невысокой связности может быть проведен на основе МАИ [14].

Для этого:

1. Определим приоритеты рассматриваемых технологических трендов в предположении взаимной независимости критериев и альтернатив.

Значения элементов векторов приоритетов, представленные в табл. 8.

Таблица 8

Приоритеты технологических трендов при отсутствии взаимозависимостей критериев

$\bar{\rho}_n^{Pm}(K2)$	C_1^{Pm}	C_2^{Pm}	C_3^{Pm}	C_4^{Pm}	C_5^{Pm}
$\bar{\rho}_n^{Pm}(\text{ФК})$	0.30	0.29	0.22	0.14	0.05
$\bar{\rho}_n^{Pm}(\text{ТЭ})$	0.42	0.21	0.21	0.09	0.07

2. Определим приоритеты рассматриваемых технологических трендов в случае связности критериев и альтернатив (рис. 2, 3).

В табл. 9 приведены результаты расчётов на суперматрице W , полученные в предположении взаимозависимости лишь между критериями.

Таблица 9

Приоритеты технологических трендов при наличии взаимозависимостей между критериями

$\bar{\rho}_n^{Pm}(KZ^*)$	C_1^{Pm}	C_2^{Pm}	C_3^{Pm}	C_4^{Pm}	C_5^{Pm}
$\bar{\rho}_n^{Pm}(\Phi K)$	0.26	0.31	0.26	0.12	0.05
$\bar{\rho}_n^{Pm}(TЭ)$	0.43	0.16	0.20	0.09	0.11

Результаты проведенного анализа, представленные в табл. 7 и 8, показывают, что в случае взаимозависимости критериев заметно изменилась приоритеты технологических трендов.

Так, в части функциональной оценки $\bar{\rho}_n^{Pm}(\Phi K)$:

- ◆ на первое место выходят технологии создания быстродействующей компонентной базы, приоритет которых заметно выше технологий интеграции (которым соответствует первый приоритет в табл. 8)

- ◆ и технологий генерации и хранения энергии (разделяют 2 и 3 места в табл. 9).

Можно полагать, что такое положение связано с тем, что в силу специфики функционального использования рассматриваемых РЛК требование высокой скорости обработки информации является преобладающим. Этот факт более четко проявляется при учёте взаимозависимостей между используемыми критериями.

В части технико-экономической оценки $\bar{\rho}_n^{Pm}(TЭ)$:

- ◆ первый приоритет по-прежнему сохраняется за технологиями интеграции,

- ◆ а на вторую позицию выходят технологии генерации и хранения энергии.

Такая ранжировка, связана с более точной оценкой приоритетов для данной предметной области применения рассматриваемых РЛК, где вопросы ограничения массогабаритных характеристик и энергообеспечения выходят на передний план, и эта ситуация более адекватно отображается при учёте взаимозависимости используемых критериев.

Шестой этап. На основании результатов полученных на этапах 3-6 можно получить интегральные оценки приоритетов отдельных технологий с учетом связности критериев KZ^* и связного логического графа технологий G_n^{Pm} .

Оценка вектора приоритетов отдельных технологий может быть получена по критерию $K3(c_{ij}^n)$ – какая из сравниваемых технологий наиболее значима для реализации тренда.

Полученные интегральные оценки приоритетов отдельных технологий $\bar{\rho}_{ij}^{Pm}(c_{ij}^n)$ для групп функциональных и технико-экономических критериев представлены в табл. 1.

Выводы. Рассмотрена прикладная задача сравнительной оценки приоритетов направлений исследований и разработок для создания РЛК для выбранного сегмента сенсорной решетки СЦУ.

Предложена процедура формирования иерархической системы критериев и поэтапного анализа векторов приоритетов.

Проведен анализ ее эффективности на примере создания и развития технологических трендов и технологий радиолокационной составляющей сенсорной решетки СЦУ.

Показано, что использование метода аналитических сетей в случае связности критериев и технологий обеспечивает:

- ◆ получение более достоверных оценок приоритетов и построения прогнозов технологического развития и имеет значительные преимущества перед существующими подходами.

- ◆ снижение рисков при построении дорожных карт и программ научно-технологического развития и получении более объективных прогнозных оценок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Буренок В.М., Кравченко Ф.Ю., Смирнов С.С.* Курс – на сетцентрическую систему вооружения. – URL: <http://www.dogswar.ru/> (дата обращения: 06.04.2016).
2. *Буренок В.М.* Базис сетцентрических войн – опережение, интеллект, инновации. Независимое военное обозрение, 02.04.2010. – URL: http://nvo.ng.ru/concepts/2010-04-02/1_bazis.html?print=Y (дата обращения: 06.04.2016).
3. *Хамзатов М.М.* Влияние концепции сетцентрической войны на характер современных операций // Военная мысль. – 2006. – № 7. – С. 13-17.
4. *Кондратьев А.Е.* Проблемные вопросы исследования новых сетцентрических концепций вооруженных сил ведущих зарубежных стран // Военная мысль. – 2009. – № 11. – С. 61-74.
5. *Долгополов А.В., Богданов С.А.* Эволюция форм и способов ведения вооружённой борьбы в сетцентрических условиях // Военная мысль. – 2011. – № 2. – С. 49-58.
6. *Белевцев А.М., Бальбердин В.А., Бендерский Г.П., Белевцев А.А.* Анализ направлений развития нано- и IT-технологий для построения специализированных сетевых коммуникационных систем нового поколения // Известия ЮФУ, Технические науки. – 2015. – № 3. – С. 35-45.
7. *Seidler S.* Principles of Computer Communications Network Design. – Chichester: Horwood, 1992. – 507 p.
8. *Kurt G., Khoshkholgh M.G., Alfattani S., Ibrahim A., Darwish T.S.J., Alam M.S., ... Yongacoglu A.* A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future (Version 4) // arXiv. – 2020. <http://doi.org/10.48550/ARXIV.2007.15088>.
9. *Паршин С.А., Горбачев Ю.Е., Кожанов Ю.А.* Современные тенденции развития теории и практики управления в вооруженных силах США. – М.: ЛЕНАНД, 2009. – 268 с.
10. *Бальбердин В.А., Зубарев И.В., Панов В.В., Степанов О.А.* Прикладные аспекты автоматизации управления войсками и оружием в современных условиях. – М.: 3 ЦНИИ МО РФ, 2013. – 168 с.
11. *Бальбердин В.А., Белевцев А.М., Бендерский Г.П.* Прикладные методы оценки и выбора решений в стратегических задачах инновационного менеджмента. – М.: Дашков, 2013. – 240 с.
12. «Рогозин назвал пять потенциальных угроз для России», РБК daily, 2013. – <http://rbedaily.ru/politics/562949987608613>.
13. *Saaty T.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 314 с.
14. *Saaty T.L.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях. – М.: Либроком, 2009. – 358 с.
15. ISO/IEC 25010. Systems and Software Engineering // Systems and Software Quality Requirements and Evaluation. – 2010.
16. ISO/IEC 25023. Systems and Software Engineering // Systems and Requirements and Evaluation. Measurement of System and Software Product Quality. – 2012.
17. *Saaty T.L.* Decision Making for Leaders. RWS Publications. – Ellswjorth Ave, Pittsburg, PA, 1999. – 360 p.
18. *Saaty T.L.* The Brain, Unraveling the Mystery of How It Works: The Neutral Network Process. – RWS Publications. Pittsburg, PA 152123, 2000. – 220 p.
19. DARPA's ISIS – Integrated Sensor is Structure [Surveillance Airship].
20. Lockheed Martin Lighter-Than-Air Programs. <http://kiss.caltech.edu/workshops/airship2013/presentations/horvarter.pdf> (дата обращения: 06.04.2016).
21. ISIS – Integrated Sensor Is Structure Disruptive, Affordable, C2ISR Persistence. http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/aero/documents/P11-1155528_ISIS%20Litho%20Print.pdf (дата обращения: 06.04.2016).
22. ISIS - проект DARPA по созданию беспилотного дирижабля-шпиона. – URL: <http://rnns.ru/137273-isis-proekt-darpa-po-sozdaniyu-bespilotnogo.html> (дата обращения: 06.04.2016).
23. HAPS – High-altitude platform systems - International Telecommunication Union (ITU). – <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx> 2025.
24. HAPS – missions to the edge of space to watch over Earth - European Space Agency. – https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/HAPS_missions_to_the_edge_of_space_to_watch_over_Earth 2018.
25. *Белевцев А.А., Белевцев А.М., Бальбердин В.А.* Методика анализа и оценки приоритетов технологических трендов и технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 6.

REFERENCES

1. *Burenok V.M., Kravchenko F.Yu., Smirnov S.S.* Kurs – na setetsentricheskuyu sistemu vooruzheniya [Heading towards a network-centric weapons system]. Available at: <http://www.dogswar.ru/> (accessed 06 April 2016).

2. *Burenok V.M.* Bazas setetsentricheskikh voyn – operezhenie, intellekt, innovatsii. Nezavisimoe voennoe obozrenie, 02.04.2010 [The basis of network-centric warfare – advancing, intelligence, innovation. Nezavisimoye Voyennoye Obozreniye, 02.04.2010]. Available at: http://nvo.ng.ru/concepts/2010-04-02/1_bazis.html?print=Y (accessed 06 April 2016).
3. *Khamzatov M.M.* Vliyanie kontseptsii setetsentricheskoy voyny na kharakter sovremennykh operatsiy [The impact of the concept of network-centric warfare on the nature of modern operations], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2006, No. 7, pp. 13-17.
4. *Kondrat'ev A.E.* Problemnye voprosy issledovaniya novykh setetsentricheskikh kontseptsiy vooruzhennykh sil vedushchikh zarubezhnykh stran [Problematic issues in the study of new network-centric concepts of the armed forces of leading foreign countries], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2009, No. 11, pp. 61-74.
5. *Dolgopolov A.V., Bogdanov S.A.* Evolyutsiya form i sposobov vedeniya vooruzhennoy bor'by v setetsentricheskikh usloviyakh [Evolution of forms and methods of conducting armed warfare in network-centric conditions], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2011, No. 2, pp. 49-58.
6. *Belevtsev A.M., Balyberdin V.A., Benderskiy G.P., Belevtsev A.A.* Analiz napravleniy razvitiya nano- i IT-tehnologiy dlya postroeniya spetsializirovannykh setevykh kommunikatsionnykh sistem novogo pokoleniya [Analysis of development directions of nano- and IT technologies for building specialized new-generation network communication systems], *Izvestiya YuFU, Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 3, pp. 35-45.
7. *Seidler S.* Principles of Computer Communications Network Design. Chichester: Horwood, 1992, 507 p.
8. *Kurt G., Khoshkolgh M.G., Alfattani S., Ibrahim A., Darwish T.S.J., Alam M.S., ... Yongacoglu A.* A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future (Version 4), *arXiv*, 2020. Available at: <http://doi.org/10.48550/ARXIV.2007.15088>.
9. *Parshin S.A., Gorbachev Yu.E., Kozhanov Yu.A.* Sovremennye tendentsii razvitiya teorii i praktiki upravleniya v vooruzhennykh silakh SShA [Modern trends in the development of the theory and practice of control in the US armed forces]. Moscow: LENAND, 2009, 268 p.
10. *Balyberdin V.A., Zubarev I.V., Panov V.V., Stepanov O.A.* Prikladnye aspekty avtomatizatsii upravleniya voyskami i oruzhiem v sovremennykh usloviyakh [Applied aspects of the automation of troop and weapons control in modern conditions]. Moscow: 3 TSNI MO RF, 2013, 168 p.
11. *Balyberdin V.A., Belevtsev A.M., Benderskiy G.P.* Prikladnye metody otsenki i vybora resheniy v strategicheskikh zadachakh innovatsionnogo menedzhmenta [Applied methods of evaluation and selection of solutions in strategic tasks of innovation management]. Moscow: Dashkov, 2013, 240 p.
12. «Rogozin nazval pyat' potentsial'nykh ugroz dlya Rossii», RBK daily, 2013 ["Rogozin Named Five Potential Threats to Russia", RBC Daily, 2013]. Available at: <http://rbcdaily.ru/politics/562949987608613>.
13. *Saati T.* Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy [Decision making. The analytic hierarchy process]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 314 p.
14. *Saati T.L.* Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh [Decision making with dependencies and feedbacks]. Moscow: Librokom, 2009, 358 p.
15. ISO/IEC 25010. Systems and Software Engineering, *Systems and Software Quality Requirements and Evaluation*, 2010.
16. ISO/IEC 25023. Systems and Software Engineering, *Systems and Requirements and Evaluation. Measurement of System and Software Product Quality*, 2012.
17. *Saati T.L.* Decision Making for Leaders. RWS Publications. Ellswjorth Ave, Pittsburgh, PA, 1999, 360 p.
18. *Saati T.L.* The Brain, Unraveling the Mystery of How It Works: The Neutral Network Process. RWS Publications. Pittsburgh, PA 152123, 2000, 220 p.
19. DARPA's ISIS – Integrated Sensor is Structure [Surveillance Airship].
20. Lockheed Martin Lighter-Than-Air Programs. Available at: <http://kiss.caltech.edu/workshops/airship2013/presentations/horvarter.pdf> (accessed 06 April 2016).
21. ISIS – Integrated Sensor Is Structure Disruptive, Affordable, C2ISR Persistence. Available at: http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/aero/documents/P11-1155528_ISIS%20Litho%20Print.pdf (accessed 06 April 2016).
22. ISIS - proekt DARPA po sozdaniyu bespilotnogo dirizhablya-shpiona [ISIS is a DARPA project to create an unmanned spy airship]. Available at: <http://rns.ru/137273-isis-proekt-darpa-po-sozdaniyu-bespilotnogo.html> (accessed 06 April 2016).
23. HAPS – High-altitude platform systems - International Telecommunication Union (ITU). Available at: <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx> 2025.
24. HAPS – missions to the edge of space to watch over Earth - European Space Agency. Available at: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/HAPS_missions_to_the_edge_of_space_to_watch_over_Earth 2018.

25. Belevtsev A.A., Belevtsev A.M., Balyberdin V.A. Metodika analiza i otsenki prioritetrov tekhnologicheskikh trendov i tekhnologiy [Methodology for analysis and assessment of priorities of technological trends and technologies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 6.

Белевцев Андрей Михайлович – Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79037691788; д.т.н.; профессор.

Белевцев Андрей Андреевич – ПАО «Сбербанк»; e-mail: Andrey.Belevtsev@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: + 74959575731.

Балыбердин Валерий Алексеевич – 3 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79162386854; д.т.н.; профессор; заслуженный деятель науки РФ; в.н.с.

Belevtsev Andrey Michailovitch – Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: ambelevtsev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79037691788; dr. of eng. sc.; professor.

Belevtsev Andrey Andreevich – Sberbank PJSC; e-mail: Andrey.Belevtsev@gmail.com; Moscow, Russia; phone: + 74959575731.

Balyberdin Valery Alekseevich – 3 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: balyberdinvaleri@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79162386854; dr. of eng. sc.; professor; Honored Scientist of the Russian Federation; leading researcher.

УДК 004.4

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-58-80

Н.Д. Болдырев, В.В. Гилка, А.С. Кузнецова, Д.А. Морозов

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОНИТОРИНГУ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ: ОБЗОР И КОНЦЕПЦИЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ БПЛА

Природные пожары ежегодно наносят серьёзный урон экосистемам, экономике и безопасности населения, а своевременное обнаружение возгораний и прогнозирование их развития повышает оперативность реагирования на угрозу и позволяет оптимально распределять ресурсы при ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС). Существующие методы мониторинга ограничены скоростью обнаружения очагов возгорания и оперативностью их дальнейшего распространения, что снижает эффективность действий спасательных служб. Для решения данной проблемы могут использоваться гетерогенные источники данных, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА), распределённые датчиковые сети, мобильные комплексы полевого наблюдения, наземные тепловизионные станции и т.д., которые могут способствовать проведению более точного анализа текущей обстановки и повышению достоверности прогнозных моделей распространения пожаров. Целью исследования стала разработка концепции автоматизированного подхода к мониторингу и прогнозированию природных пожаров на основе беспилотных летательных аппаратов. Мы считаем, что такой подход сумеет повысить оперативность обнаружения очагов возгорания и точность прогнозирования их распространения. Задачи включают анализ существующих методов мониторинга, формирование концепции системы, интегрирующей многоспектральную съёмку, оптимизированную передачу данных, автоматическую сегментацию и прогнозирование на основе машинного обучения, а также обеспечивающей взаимодействие оператора и специалистов по оповещению. В работе использовались методы сбора, анализа и передачи данных с БПЛА, обработка многоспектральных изображений, машинное обучение и нейронные сети для детекции очагов возгорания, алгоритмы сегментации изображений и имитационное моделирование для прогнозирования распространения огня, визуализация данных для поддержки принятия решений оператором и администратором, логирование и анализ результатов для обучения моделей, программная инженерия и технологии человеко-машинного взаимодействия. Система сократит время обнаружения и прогнозирования пожаров, предоставит возможность оператору запускать несколько дронов одновременно и автоматизирует обработку получаемых с них данных. Автоматизация процессов позволит сократить время реакции на ЧС и численность персонала,

улучшить распределение ресурсов, повысить точность прогнозов и своевременность информирования экстренных служб. Это поможет снизить ущерб от природных пожаров и повысить безопасность населения и экосистем. Несмотря на существующие успехи, достигнутые в решении этой задачи, комплексная система, концепция которой описывается в данной статье, пока не существует в полной мере ни в России и странах СНГ, ни в западных и азиатских странах. Хотя отдельные компоненты, такие как БПЛА для мониторинга и искусственный интеллект (ИИ) для анализа данных, уже активно используются, интегрированного решения, которое бы объединяло все элементы (управление дронами, прогнозирование распространения огня в режиме, приближенном к реальному времени, передача данных и взаимодействие с экстренными службами), на данный момент нет. Эта концепция представляет собой новый подход, который может стать прорывной технологией для борьбы с природными катастрофами.

Природные пожары; мониторинг; прогнозирование; беспилотные летательные аппараты; автоматизированные системы; машинное обучение; обработка изображений; нейронные сети; ситуационное реагирование; анализ данных.

N.D. Boldyrev, V.V. Gilka, A.S. Kuznetsova, D.A. Morozov

MODERN APPROACHES TO NATURAL FIRE MONITORING AND FORECASTING: REVIEW AND CONCEPT OF AUTONOMOUS UAV-BASED SYSTEM

Natural fires cause serious damage to ecosystems, the economy, and public safety every year, and timely detection of fires and prediction of their development increases the speed of response to threats and allows for optimal allocation of resources during emergency response. Existing monitoring methods are limited by the speed of detecting fire outbreaks and the speed of their further spread, which reduces the effectiveness of rescue services. To solve this problem, heterogeneous data sources can be used, including unmanned aerial vehicles (UAVs), distributed sensor networks, mobile field observation systems, ground-based thermal imaging stations, etc., which can contribute to a more accurate analysis of the current situation and improve the reliability of predictive models of fire spread. The aim of the study was to develop a concept for an automated approach to monitoring and predicting wildfires based on unmanned aerial vehicles. We believe that this approach will improve the speed of detecting fire outbreaks and the accuracy of predicting their spread. The tasks include analyzing existing monitoring methods, developing a concept for a system that integrates multispectral imaging, optimized data transmission, automatic segmentation, and forecasting based on machine learning, as well as ensuring interaction between the operator and alert specialists. The work used methods of collecting, analyzing, and transmitting data from UAVs, processing multispectral images, machine learning and neural networks for fire detection, image segmentation algorithms and simulation modeling for fire spread prediction, data visualization to support decision-making by operators and administrators, logging and analysis of results for model training, software engineering, and human-computer interaction technologies. The system will reduce the time required to detect and predict fires, enable operators to launch multiple drones simultaneously, and automate the processing of data received from them. Process automation will reduce emergency response times and staffing levels, improve resource allocation, increase forecast accuracy, and improve the timeliness of emergency service notifications. This will help reduce damage from wildfires and improve the safety of people and ecosystems. Despite the progress made in addressing this challenge, the comprehensive system described in this article does not yet exist in its entirety in Russia, the CIS countries, or in Western and Asian countries. Although individual components, such as UAVs for monitoring and artificial intelligence (AI) for data analysis, are already in active use, there is currently no integrated solution that combines all elements (drone control, near real-time fire spread prediction, data transmission, and interaction with emergency services). does not currently exist. This concept represents a new approach that could become a breakthrough technology for combating natural disasters.

Wildfires; monitoring; forecasting; unmanned aerial vehicles; automated systems; machine learning; image processing; neural networks; situational response; data analysis.

Введение. Природные пожары – это одна из самых острых экологических проблем, с которой сталкиваются многие регионы мира. Каждый год они наносят серьезный ущерб окружающей среде, экономике, а в ряде случаев – безопасности населения. Во многих странах фиксируются десятки и сотни очагов возгораний, а масштабы пострадавших территорий исчисляются миллионами гектаров. По данным «Всемирной метеорологической организации», ежегодно огонь уничтожает огромные площади, нарушает природный ба-

ланс, ухудшает качество воздуха и приводит к утрате уникальных экосистем [1, 2]. Рост числа пожаров и темпов их распространения во многом связан с изменениями климата, а также с деятельностью человека. Всё это делает задачу своевременного обнаружения и прогнозирования природных возгораний особенно важной – как для охраны природы, так и для обеспечения техногенной и экологической безопасности. Чем быстрее удаётся зафиксировать очаг и понять, куда может распространиться пламя, тем выше шансы на оперативное реагирование и минимизацию последствий.

В этом обзоре мы кратко остановимся на современных методах мониторинга природных пожаров и подходах к прогнозированию их развития, отметим их сильные стороны и недостатки. После этого рассмотрим существующие технические решения и подробно представим собственную концепцию системы, не имеющей прямых аналогов по степени интеграции и автономности. В её основе лежат передовые цифровые технологии, включая беспилотные летательные аппараты и интеллектуальный анализ данных. При подготовке обзора мы использовали общепринятый метод анализа источников: собирали и систематизировали информацию, сравнивали подходы и проводили обобщение. В качестве базы послужили как научные публикации последних лет, так и специализированные электронные ресурсы, посвящённые тематике прогнозирования распространения природных пожаров и средствам их мониторинга.

Существующие методы мониторинга природных пожаров. В настоящее время для мониторинга природных пожаров применяются несколько традиционных методов, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками.

Один из наиболее известных подходов представленных в соответствии с рис. 1 – использование стационарных пожарных вышек, оснащённых оборудованием для визуального наблюдения и фиксации возгораний на обширных территориях. Такие вышки, как правило, устанавливаются в стратегически важных точках и обеспечивают удалённый сбор информации в течение продолжительного времени. К основным достоинствам можно отнести относительную простоту эксплуатации, стабильную работу в течение длительных периодов и сравнительно низкие затраты на техническое обслуживание. Однако этот подход не лишён недостатков. Возможности наблюдения с вышек ограничиваются зоной прямой видимости, поэтому для покрытия больших природных массивов, особенно если это леса, требуется значительное количество подобных сооружений. Это, в свою очередь, увеличивает затраты на их размещение и обслуживание. Кроме того, вышки лишены мобильности: в случае неблагоприятных погодных условий, природных катастроф или необходимости переноса зоны наблюдения, они остаются неподвижными и не могут быть быстро перемещены. Ещё один существенный недостаток – зависимость от погодных условий. Туман, дождь, дым и другие атмосферные явления могут серьёзно снижать эффективность визуального наблюдения.



Рис. 1. Пожарная вышка на Ильменском хребте

Также стоит учитывать ограниченность метода в контексте раннего обнаружения: небольшие очаги, скрытые под пологом деревьев или ещё не проявившиеся открытым пламенем, могут остаться незамеченными. Это увеличивает время реагирования и повышает риск быстрого распространения пожара [3].

Ещё один широко применяемый способ мониторинга – это использование спутниковых систем, способных фиксировать температурные аномалии, дымовые выбросы и отражённое излучение с поверхности Земли, чтобы находить возможные возгорания (рис. 2). Спутники позволяют охватывать огромные площади, что делает их особенно ценными для наблюдения за природными пожарами. К числу очевидных преимуществ относится возможность быстрого сбора данных с больших площадей, а также относительная независимость от времени суток – многие спутники работают в инфракрасном диапазоне и могут осуществлять наблюдение круглосуточно [4–7]. Кроме того, в некоторых случаях они остаются работоспособными даже при частичной облачности, обеспечивая почти непрерывный поток информации. Тем не менее, и у спутникового мониторинга есть свои ограничения. Прежде всего, это сравнительно низкое пространственное разрешение – особенно у систем с широким охватом. Это затрудняет точную локализацию небольших очагов пожара, особенно если они возникают под кронами деревьев или сопровождаются плотным задымлением. Также стоит учитывать временные задержки: между съёмкой и получением обработанных данных может проходить значительное время, что ограничивает возможности оперативного реагирования. В условиях, когда счёт идёт на часы, это критично. Дополнительную сложность создают и погодные условия. Обильная облачность, атмосферные помехи или сильные ветра могут существенно повлиять на качество снимков. Всё это делает спутниковый метод не самым эффективным инструментом для раннего обнаружения возгораний.

Далее рассмотрим метод, основывающийся на авиационном мониторинге представленном в соответствии с рис. 3. Он предполагает использование пилотируемых вертолётов, которые выполняют облёты территорий, проводят визуальную съёмку, фотографирование и тепловизионное сканирование очагов возгорания.



Рис. 2. Снимок природного пожара в Рязанской области со спутниковых систем

Такой подход позволяет оперативно получать данные о масштабах и характере пожаров, включая информацию, недоступную с земли или с использованием стационарных систем. К преимуществам этого метода относится широкая зона охвата – особенно это актуально для труднодоступных или удалённых регионов, где другие методы могут быть неэффективны или вовсе неприменимы. Авиация позволяет не только обнаруживать крупные и малые очаги пожара, но и быстро оценивать интенсивность горения, а также потенциальные риски для населённых пунктов, объектов инфраструктуры и охраняемых природных территорий. В некоторых случаях лётные средства участвуют не только в наблюдении, но и в активном тушении – например, сбрасывая воду или огнегасящие составы, чтобы сдержать

распространение огня до прибытия наземных подразделений. Вместе с тем у авиационного метода есть и серьёзные ограничения. В первую очередь – высокая стоимость: как сами транспортные средства, так и их обслуживание, топливо, экипажи и организация полётов требуют значительных финансовых и логистических ресурсов. Кроме того, погодные условия оказывают сильное влияние на эффективность воздушного мониторинга. Облачность, туман, осадки или сильный ветер снижают видимость и, соответственно, точность получаемой информации. Всё это делает авиацию ценным, но далеко не универсальным инструментом в системе мониторинга природных пожаров. Также важно учитывать, что авиационные наблюдения не могут вестись непрерывно – полёты ограничены по времени, требуют предварительной подготовки и часто требуют повторных вылетов для более подробного мониторинга. Это снижает оперативность реакции в случае резкого изменения обстановки на местности. Таким образом, несмотря на высокую информативность и мобильность, авиационный мониторинг сложно рассматривать как универсальное решение – он скорее выступает в роли дополнительного инструмента, особенно эффективного на стадии оценки масштабов уже обнаруженного возгорания и, конечно же, в процессе его тушения.

Беспилотные летательные аппараты начали активно использовать для мониторинга природных пожаров примерно с начала 2000-х годов. Это стало возможным благодаря развитию технологий – дроны стали компактнее, сенсоры точнее, а спутниковая навигация доступнее. С этого момента они начали всё чаще применяться не только в военных, но и в гражданских задачах, в том числе для наблюдения за природными пожарами.



Рис. 3. Вертолёт Ми-8, используемый МЧС России в авиационном мониторинге

Сегодня дроны – один из основных инструментов, когда речь идёт о мониторинге массивов территорий. Их используют для регулярных облётов и поиска новых очагов возгорания [8]. Такие аппараты оснащаются камерами, тепловизорами, датчиками климата и GPS-модулями, что позволяет получать точную информацию и быстро передавать её в центр управления. Благодаря своей манёвренности они легко добираются до труднодоступных мест и могут работать там, где другой транспорт попросту не пройдёт. В отличие от пилотируемых самолётов, дроны проще в обслуживании и быстрее в развёртывании. Они могут долго находиться в воздухе и практически не требуют вмешательства человека в процессе работы. Всё это делает их незаменимыми помощниками при мониторинге природных пожаров. БПЛА принято классифицировать на три основных типа, каждый из которых оптимизирован для различных условий применения [9] и обладает своими преимуществами и ограничениями.

Вертолётный тип (VTOL) включает в себя все дроны, способные вертикально взлетать и садиться. К таким БПЛА относят: Многоцелевые малые дроны (квадрокоптеры) и Большие VTOL-дроны (рис. 4).

Многоцелевые малые дроны (квадрокоптеры) применяются для локального мониторинга небольших территорий и обследования очагов возгорания в сложных условиях. Их ключевые достоинства – лёгкость управления, высокая манёвренность, в том числе в ограниченных и труднодоступных пространствах, сравнительно низкая стоимость эксплуатации и возможность полётов на малых высотах, включая ночное время с приме-

нием тепловизоров. Такие аппараты способны передавать фото- и видеоинформацию или обеспечивать видеотрансляцию в режиме, приближенном к реальному времени [10]. Основные недостатки – ограниченное время полёта и малая площадь покрытия. Большие VTOL-дроны способны выполнять долговременные миссии (до нескольких часов) на больших территориях, включая труднодоступные и удалённые участки. Эти аппараты обладают высокой грузоподъёмностью для установки разнообразных сенсоров и камер, а также достаточной манёвренностью для работы в ограниченных пространствах. Вместе с тем они требуют высококвалифицированных операторов, имеют более высокие эксплуатационные затраты и, из-за больших габаритов и веса, уступают в манёвренности квадрокоптерам [11].



Рис. 4. БПЛА вертолётного типа, применяемые МЧС России для мониторинга природных пожаров: а – квадрокоптер «Фантом 4»; б – Большой БПЛА вертолётного типа «БВС-ВТ 450»

Самолётный тип включает в себя дроны с традиционным горизонтальным взлётом и посадкой предназначены для длительного патрулирования обширных и удалённых территорий, таких как крупные лесные массивы, горные районы и труднодоступные зоны (рис. 5). Турбовинтовые БПЛА, способны осуществлять продолжительный полёт на большие расстояния (до сотен километров), работать на больших высотах и обеспечивать мониторинг в сложных климатических условиях. Они отличаются более низкой стоимостью эксплуатации на единицу полёта по сравнению с пилотируемой авиацией. Основные ограничения включают необходимость взлётно-посадочных полос или катапульт, меньшую манёвренность, невозможность зависать над очагами, а также ограниченную работоспособность в ночное время и при неблагоприятных погодных условиях без дополнительного оборудования.



Рис. 5. БПЛА самолётного типа «Орлан-10» [12], применяемый МЧС России для мониторинга природных пожаров

Категория Гибридные VTOL-дроны объединяет аппараты, сочетающие ключевые преимущества вертолётных и самолётных типов: возможность вертикального взлёта и посадки с последующим переходом в экономичный горизонтальный полёт (рис. 6). Они

обеспечивают расширенную дальность и время работы, сохраняя при этом манёвренность и гибкость. Применение таких дронов актуально для длительного мониторинга больших территорий с возможностью оперативного реагирования в сложных условиях. Их преимущества включают отсутствие необходимости в взлётно-посадочных полосах, увеличенное время полёта (до нескольких часов), а также адаптивность к разным ландшафтам благодаря переключению режимов полёта. Недостатки связаны с высокой стоимостью, сложностью эксплуатации и обслуживания, необходимостью в квалифицированных операторах, а также большими размерами и весом.



Рис. 6. БПЛА гибридного типа InnoVtol-3s

Использование распределённых сетей стационарных датчиков для мониторинга природных пожаров стало одним из наиболее современных и эффективных методов раннего обнаружения возгораний. Такие системы, часто обозначаемые как системы датчиков окружающей среды (Environmental Sensor Networks, ESN), предназначены для постоянного измерения и анализа ключевых параметров окружающей среды, что позволяет оперативно выявлять очаги возгорания на самых ранних стадиях [13]. Датчики размещаются на заранее выбранных участках, где они непрерывно регистрируют параметры, связанные с риском возгорания, такие как температура воздуха и поверхности, влажность, концентрация дыма и продуктов горения (газов, аэрозолей), а также скорость и направление ветра, оптические параметры с помощью фото- и видеодатчиков. Собранный информация передаётся в центральную систему, где она подвергается анализу с использованием алгоритмов для обнаружения аномалий и методов машинного обучения. В случае выявления признаков возгорания система автоматически генерирует тревожные сигналы, что позволяет оперативно реагировать на ситуацию. Среди главных достоинств этого подхода – возможность раннего обнаружения пожаров, когда возгорание ещё не сопровождается открытым пламенем, а только появляется дым или локальное повышение температуры. Системы с такими датчиками обеспечивают круглосуточный и непрерывный мониторинг, не зависящий от погодных условий и времени суток [13, 14].

Этот метод позволяет значительно повысить уровень автоматизации и снизить затраты, так как исключает необходимость постоянного ручного патрулирования территории, что в свою очередь сокращает трудозатраты и ускоряет реакцию. Дополнительно, географическое распределение датчиков повышает точность определения местоположения очагов возгорания, что особенно важно для быстрого реагирования. Тем не менее, система датчиков не лишена недостатков. Для эффективного охвата больших территорий требуется плотная сеть сенсоров, что приводит к высоким затратам и усложняет развёртывание. Ключевой проблемой остаётся зависимость от инфраструктуры: устойчивая передача данных критически важна, особенно в удалённых районах с плохой связью, а это дополнительно повышает требования к коммуникациям. Ещё один нюанс – ограниченный радиус действия датчиков. Чтобы избежать «слепых зон», их расположение приходится тщательно просчитывать, а это добавляет сложностей на этапе проектирования системы.

Ещё один широко применяемый способ мониторинга – это наземное патрулирование. Специалисты обходят определённые участки местности, визуально оценивая обстановку и выявляя возможные очаги возгорания. Такой подход также используется для контроля доступа в зоны повышенной пожарной опасности, особенно в жаркий сезон. Одним из главных плюсов этого метода считается высокая точность. Находясь непосредственно на месте, человек способен заметить то, что может быть упущено при съёмке с воздуха – едва уловимый запах гари, незначительное задымление, локальные изменения температуры. В процессе обхода сотрудники могут сразу проводить простые измерения: температуру воздуха, влажность, уровень задымлённости, концентрацию угарного газа и другие параметры, которые помогают более точно оценить ситуацию. Кроме того, этот способ позволяет оперативно реагировать на происходящее. Патруль может быть быстро направлен в нужную точку, если появилась информация о подозрительной активности или потенциальной угрозе. Такая гибкость особенно важна в условиях, когда обстановка может меняться буквально за часы. Однако у этого метода есть и серьёзные ограничения. В первую очередь – это низкая скорость и малая зона охвата. Один специалист может обследовать лишь ограниченный участок, а на полный обход больших территорий уходит много времени. В условиях активного пожара или угрозы распространения огня это может оказаться критичным. Кроме того, эффективность такого мониторинга сильно зависит от погодных условий – туман, дождь или снег могут сделать патрулирование невозможным. Метод также достаточно ресурсоёмкий: требует большого количества людей, оборудования и постоянной координации с центром управления. По этой причине наземные обходы сегодня чаще используются как вспомогательный инструмент – в сочетании с другими, более технологичными средствами наблюдения.

Перспективность применения БПЛА и ИИ. С развитием технологий беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и системы на базе искусственного интеллекта (ИИ) становятся всё более доступными, что открывает новые возможности для организации эффективного мониторинга природных пожаров. Дроны обеспечивают высокую мобильность и позволяют быстро получать данные даже из труднодоступных районов, где применение традиционных средств наблюдения затруднено. При этом передаваемая информация может поступать практически в реальном времени, что особенно важно в условиях быстро меняющейся обстановки. В свою очередь, алгоритмы искусственного интеллекта и машинного обучения дают возможность не только обрабатывать и анализировать большие объёмы данных, но и строить прогнозы – например, моделировать возможные направления и скорость распространения огня. Сочетание этих технологий позволяет создать системы, способные действовать автономно, с высокой точностью и минимальной задержкой. Это в значительной степени повышает шансы на своевременное выявление угроз и даёт возможность более точно и эффективно управлять ситуацией в условиях природных катастроф.

Обзор существующих решений для мониторинга и детекции пожаров. Одним из ключевых инструментов, используемых для мониторинга природных пожаров, остаются спутниковые системы дистанционного зондирования, такие как Landsat [4], MODIS [5] и Sentinel-2 [6]. Эти платформы обеспечивают регулярную съёмку больших территорий и позволяют фиксировать как активные очаги возгорания, так и сопутствующие явления – дымовые шлейфы, термические аномалии и изменения в структуре растительности. Благодаря широкому охвату и независимости от наземной инфраструктуры, спутниковые системы играют важную роль в отслеживании динамики природных катастроф и оценке их последствий. Спутники семейства Landsat обеспечивают съёмку с пространственным разрешением до 30 метров, что позволяет достаточно точно регистрировать крупные очаги пожара, а также картографировать зоны, уже пройденные огнём. Эти данные широко используются для анализа последствий, построения тематических карт повреждённых участков и оценки общего масштаба ущерба. Однако у системы есть и серьёзное ограничение: съёмка одной и той же территории осуществляется с интервалом в несколько дней, а иногда и дольше [4]. При стремительном распространении огня такой темп обновления информации оказывается недостаточным для оперативного реагирования, что снижает эффективность применения Landsat в задачах реального времени.

Система MODIS, установленная на спутниках Terra и Aqua, отличается высокой частотой съёмки – одни и те же участки поверхности могут фиксироваться до двух раз в сутки. Это делает её особенно ценной для мониторинга пожаров в динамике, с возможностью приближённого отслеживания изменений в течение одного дня. Однако высокая частота наблюдений сопровождается сравнительно низким пространственным разрешением – около 1 километра [5], что не позволяет точно определить небольшие очаги возгорания, особенно если они частично скрыты плотной растительностью или сопровождаются сильным задымлением. Кроме того, даже при регулярной съёмке данные требуют времени на обработку, что создаёт дополнительную задержку и ограничивает применение MODIS в задачах моментального реагирования [15].

Спутники Sentinel-2, работающие в рамках европейской программы Copernicus, обеспечивают съёмку с разрешением до 10 метров, что позволяет довольно точно фиксировать очаги возгорания и оценивать масштабы пострадавших территорий. Интервалы между съёмками одной и той же области составляют примерно 5–7 дней, что делает эти данные полезными для анализа последствий пожаров и построения карт пройденных огнём участков. Однако даже при сравнительно высоком разрешении Sentinel-2 не всегда подходит для задач раннего обнаружения – между моментом съёмки и получением обработанных данных может проходить значительное время, особенно при большой нагрузке на систему или в условиях ограниченного доступа к быстрой обработке [6].

В целом, спутниковые платформы остаются важным инструментом в наблюдении за природными пожарами, особенно благодаря широкому охвату и возможности работать независимо от наземной инфраструктуры. Тем не менее, они имеют и ряд ограничений: не всегда достаточно точное разрешение, интервалы между съёмками и задержки в доступе к данным существенно снижают их эффективность в ситуациях, требующих немедленного реагирования.

Проект «Стрекоза» представляет собой перспективный беспилотный авиационный комплекс (рис. 7), разработанный специально для задач обнаружения и первичного тушения лесных пожаров. Аппараты оснащаются как оптическими, так и тепловизионными камерами, что позволяет эффективно выявлять очаги возгорания на ранних стадиях. Кроме того, дроны оборудованы специальными ёмкостями с огнетушащим составом, благодаря чему могут оперативно реагировать на обнаруженные очаги, производя локальное подавление пламени ещё до прибытия основных сил [16–18].

Такие решения особенно актуальны в труднодоступной местности, где использование наземной техники или пилотируемой авиации затруднено. Вместе с тем, проект пока находится в стадии испытаний. Для широкомасштабного внедрения «Стрекоза» требует доработки в части автономности, устойчивости к погодным условиям и адаптации под разные ландшафтные сценарии. Несмотря на это, концепция комплекса уже демонстрирует высокий потенциал и вызывает интерес со стороны служб, отвечающих за природную безопасность [18].



Рис. 7. Противопожарный БПЛА «Стрекоза»

Компания Geosalut применяет дроновые технологии (рис. 8) для мониторинга лесных территорий и своевременного обнаружения очагов возгорания. Используемые БПЛА оснащены тепловизорами, оптическими камерами и другими сенсорами, что позволяет собирать информацию в высоком разрешении и передавать её для анализа практически в режиме реального времени [19]. Такой подход даёт возможность оперативно отслеживать изменения на местности и быстро реагировать на возникающие угрозы. В то же время, как и большинство подобных решений, система имеет определённые ограничения. Радиус охвата одного аппарата остаётся относительно небольшим, что требует либо запуска сразу нескольких дронов, либо частого перемещения оборудования. Кроме того, эффективная передача данных требует стабильных и высокоскоростных каналов связи, что может быть затруднительно в удалённых или слабо покрытых сетями районах.



Рис. 8. БПЛА “Supercam S350”

Компания Geoscan представила первый отечественный комплекс для видеомониторинга пожарной обстановки, в состав которого входит беспилотный летательный аппарат (рис. 9) с возможностью передачи видеопотока в режиме, приближенном к реальному времени [20]. Такое решение позволяет оперативно получать визуальную информацию о происходящих пожарах, что особенно важно при координации действий наземных служб. Вместе с тем, система сталкивается с рядом технологических ограничений – в частности, с необходимостью передачи и обработки больших объёмов видеоданных, что требует устойчивых каналов связи и высокой вычислительной мощности.



Рис. 9. БПЛА “Геоскан 801”

Развитие подобных технологий продолжается и в научной среде. Так, в рамках проекта UTS МЕРФІ в России разрабатываются дроновые системы, ориентированные на раннее обнаружение очагов возгорания [21]. Аппараты оснащаются тепловизионными камерами и сенсорами, способными фиксировать горячие точки и температурные аномалии. Это позволяет значительно сократить время между началом пожара и его обнаружением.

Однако и здесь остаются нерешёнными задачи, связанные с ограниченным радиусом действия дронов, необходимостью регулярного обслуживания и затратами на поддержание инфраструктуры.

В последние годы заметно усилился интерес к применению технологий искусственного интеллекта в задачах обнаружения и анализа природных пожаров [22–25]. Особенно активно развиваются решения, основанные на алгоритмах машинного обучения и методах компьютерного зрения. Такие системы обучаются распознавать визуальные признаки возгораний – дым, пламя, термальные аномалии – по изображениям, поступающим с дронов или спутников [15, 24, 26].

Одним из ключевых преимуществ подобных подходов является возможность обработки данных практически в реальном времени, что существенно повышает скорость реагирования и снижает вероятность пропуска очагов. Интеллектуальные алгоритмы способны не только выявлять факт возгорания, но и фильтровать ложные срабатывания, отличая, например, дым от облаков или солнечные блики от настоящего огня [27].

Одним из примеров использования искусственного интеллекта в обнаружении пожаров является система Nix, в которой реализованы алгоритмы анализа изображений на основе нейросетевых моделей YOLO и Faster R-CNN. Эти модели хорошо зарекомендовали себя в задачах детекции объектов и позволяют с высокой точностью распознавать признаки возгорания – в том числе пламя и дым – даже в условиях задымления и ограниченной видимости [26, 28].

Система обучена отличать реальные угрозы от визуальных аномалий, таких как солнечные блики или пар, что снижает количество ложных тревог. Однако полностью исключить ошибки пока не удаётся: в сложных погодных условиях, при плотном дыме или в сумерках возможны ложные срабатывания, особенно на фоне неоднородного ландшафта. Тем не менее, подобные решения демонстрируют высокий потенциал и активно развиваются в направлении повышения устойчивости к внешним искажающим факторам.

Компания Evolonix занимается разработкой интеллектуальных систем мониторинга, в которых сочетаются возможности беспилотных летательных аппаратов и алгоритмов искусственного интеллекта. Основная задача таких систем – автоматизированный анализ данных, поступающих с различных сенсоров, включая оптические камеры и тепловизоры, установленные на борту дронов (рис. 10).

Одной из ключевых особенностей решений Evolonix является способность адаптироваться к изменениям внешней среды. Система учитывает погодные условия, уровень освещённости и другие факторы, влияющие на качество наблюдения. Это позволяет проводить анализ практически в реальном времени и с высокой точностью фиксировать признаки возгорания на самых ранних стадиях (рис. 11), ещё до того, как пожар начнёт активно распространяться [29]. Подобный подход значительно повышает шансы на своевременное реагирование и минимизацию ущерба.



Рис. 10. БПЛА NF4 от “Evolonic”



Рис. 11. Детекция возгорания с помощью системы от “Evolonic”

Несмотря на активное развитие технологий искусственного интеллекта, ручной анализ изображений по-прежнему сохраняет своё значение, особенно в сложных условиях, где автоматические системы могут допускать ошибки. В частности, при неблагоприятной погоде, сильной задымлённости или наличии частичных перекрытий (например, плотного полога деревьев) даже современные ИИ-модели не всегда способны корректно интерпретировать визуальные данные. В подобных ситуациях к анализу подключаются специалисты, которые вручную просматривают снимки – в том числе в разных спектральных диапазонах: инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом. Такой подход помогает выявить признаки возгорания даже тогда, когда пламя скрыто под пологом деревьев или визуально не различимо. При наличии опыта эксперт способен заметить тонкие температурные или визуальные аномалии, которые автоматические алгоритмы могут пропустить. Несмотря на трудоёмкость и необходимость высокой квалификации, ручной анализ по-прежнему востребован – особенно в нестандартных или сложных условиях, где точность и надёжность критически важны для своевременного принятия решений.

Обзор существующих решений для прогнозирования распространения пожаров. Современные подходы к прогнозированию распространения пожаров в основном основаны на использовании спутниковых данных в сочетании с метеорологической информацией и алгоритмами искусственного интеллекта [25, 30–34]. При этом снимки, получаемые с беспилотных летательных аппаратов, пока преимущественно применяются для обнаружения и наблюдения за уже возникшими очагами, но практически не используются для построения точных прогнозов распространения огня в режиме, близком к реальному времени. Этот аспект остаётся открытым направлением для дальнейших исследований и технологического развития.

Например, исследователи из Университета Южной Калифорнии разработали модель, которая сочетает спутниковые данные и генеративный ИИ для точного прогнозирования распространения пожаров [35].

Другие системы, такие как WRF-SFIRE [36] и CAWFE [37], интегрируют атмосферные и физические модели для предсказания поведения огня, учитывая такие факторы, как топография, влажность и скорость ветра. Эти модели позволяют более точно оценивать интенсивность и направление распространения пожара.

Кроме того, использование глубоких нейронных сетей, таких как CNN и LSTM, позволяет анализировать спутниковые изображения и метеорологические данные для прогнозирования распространения огня. Исследования показывают, что такие подходы могут значительно улучшить точность прогнозов по сравнению с традиционными методами.

Проект NASA "Wildfire Digital Twin" разрабатывает модели с высоким пространственным разрешением (10–30 м/пиксель) для прогнозирования распространения огня и дыма в реальном времени, используя данные с наземных, воздушных и спутниковых сенсоров [38, 39].

Модели, такие как MA-Net, применяют пространственные и метеорологические данные для прогнозирования направления и скорости распространения огня [40], учитывая такие факторы, как рельеф местности, тип растительности и погодные условия. Это позволяет более точно оценивать потенциальные зоны риска и заранее определять участки, требующие повышенного внимания со стороны служб реагирования.

Новизна, цель и задачи исследования. Целью данного исследования является разработка концепции эффективной и многоуровневой системы мониторинга природных пожаров, основанной на применении беспилотных летательных аппаратов и современных методов обработки данных с использованием алгоритмов машинного обучения. Предполагается, что такая система будет способна не только оперативно выявлять очаги возгорания, но и прогнозировать направление и скорость их распространения, тем самым повышая эффективность реагирования в самых разных ландшафтных и климатических условиях.

Новизна предлагаемого подхода заключается в интеграции всех компонентов – сбора, анализа и интерпретации данных – в единую архитектурную модель, ориентированную на автоматизацию процессов мониторинга и принятия решений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- ◆ провести анализ современных методов мониторинга и прогнозирования природных пожаров, выявить их преимущества и ограничения;

- ◆ разработать архитектуру для предлагаемой системы мониторинга;
- ◆ реализовать методы автоматического обнаружения очагов возгорания на основе обработки изображений и видеоданных, получаемых с беспилотных летательных аппаратов;
- ◆ создать модель прогнозирования динамики распространения пожара с учётом метеорологических данных и характеристик местности;
- ◆ обеспечить интеграцию всех компонентов системы для работы в режиме, приближенном к реальному времени.

Данный круг задач был сформулирован, поскольку только комплексный подход даёт возможность создать действительно надёжную и практически применимую систему мониторинга. Анализ существующих решений позволяет не только выявить их сильные стороны, но и понять, какие элементы требуют доработки или даже пересмотра принципов реализации. Автоматическое обнаружение очагов и прогнозирование распространения пожара – ключевые функции, без которых невозможно обеспечить своевременное и эффективное реагирование. Интеграция всех компонентов системы и организация работы в режиме, приближенном к реальному времени, открывают возможность оперативного принятия решений и своевременного вмешательства в развитие чрезвычайной ситуации. При этом важно отметить, что в рамках данного исследования мы сосредотачиваем внимание именно на природных пожарах, таких как лесные и ландшафтные, и рассматриваем применение современных беспилотных платформ и методов машинного обучения именно в этом контексте. Система не ориентирована на мониторинг бытовых или промышленных возгораний. В перспективе рассчитывается, что разработанная концепция станет не просто техническим решением, а основой для построения эффективной и масштабируемой системы, способной снизить последствия природных пожаров и стать отправной точкой для дальнейших исследований и практического внедрения.

Концепция и архитектура системы. Предлагаемая система мониторинга природных пожаров представляет собой многоуровневую платформу, состоящую из нескольких ключевых модулей, каждый из которых выполняет свою специализированную функцию. Основными компонентами системы являются: модуль управления дронами, модуль обработки изображений для обнаружения очагов возгорания, модуль прогнозирования распространения огня, модуль связи, обеспечивающий надёжную передачу данных, служебный модуль для логирования и хранения информации, а также пользовательский интерфейс для операторов, служб экстренного реагирования, аналитиков и администраторов системы. Такая архитектура (рис. 12) обеспечивает гибкость, масштабируемость и возможность интеграции с внешними источниками данных, включая метеосервисы и экстренные службы. Для наглядности и целостного восприятия рассмотрим типовой сценарий работы системы.

Сначала происходит планирование и запуск миссии. Оператор задаёт параметры патрулирования, включая маршрут или область, которую нужно обследовать, высоту полёта, настройки связи и передачи данных, а также время начала миссии. Либо он может активировать автоматический режим работы дрона, указав только время начала миссии и её тип: патрулирование области, по заданным точкам или позиционное наблюдение. При патрулировании области дрон автоматически рассчитывает оптимальный маршрут для покрытия заданной территории, учитывая ограничения ресурсов дрона и параметры, установленные оператором. На этапе построения маршрута, независимо от выбранного типа патрулирования, рассчитываются позиции съёмки, обеспечивающие оптимальное перекрытие кадров: достаточное для исключения «слепых зон», но минимизирующее количество снимков и, соответственно, нагрузку на систему хранения и обработки данных. При обнаружении очагов возгорания дрон может изменять маршрут для более детального мониторинга по указанию оператора, автоматически передавать данные на сервер и, при необходимости, возвращаться на базу. Оператор сохраняет возможность дистанционного контроля и вмешательства. После настройки параметров дрон вылетает с базы и приступает к выполнению миссии согласно заданным параметрам.

Далее происходит сбор и передача данных. Во время полёта дрон собирает изображения с камер, тепловизоров и других сенсоров. Полученные данные передаются на сервер для обработки в многоспектральном формате.

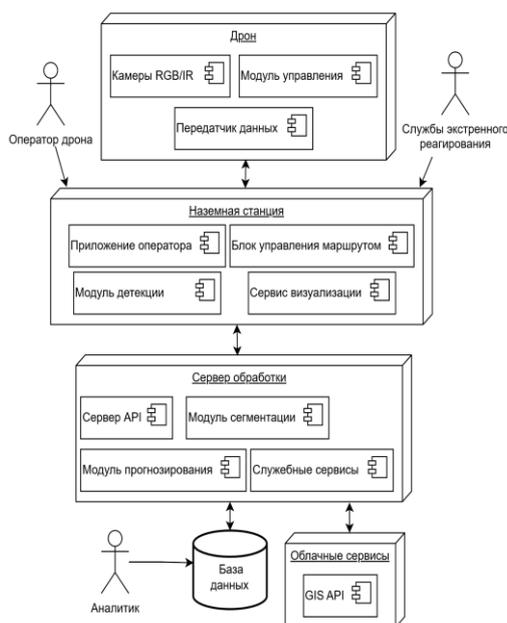


Рис. 12. Схема архитектуры автоматизированной системы мониторинга и прогнозирования природных пожаров с использованием БПЛА

В это время на сервере происходит анализ полученных данных на предмет обнаружения очагов возгорания. Модуль обработки изображений анализирует поступающие данные, выделяет очаги возгорания и оценивает степень угрозы на основе визуальной и тепловой информации.

При обнаружении возгорания на снимках происходит прогнозирование распространения пожара с учётом метеорологической информации и характеристик местности. Для определения временных промежутков прогноза необходимо учитывать несколько факторов. Во-первых, скорость распространения огня v зависит от растительности, метеоданных и рельефа. На основе эмпирических данных и моделей, таких как The Rothermel surface fire spread model [41], для лесных пожаров скорость фронта огня может варьироваться в пределах 5–15 м/мин, для степных и травяных пожаров – 10–30 м/мин, а для торфяников – 2–5 м/мин. Во-вторых, необходимо учитывать покрытие территории одним снимком с дрона. При вертикальной съёмке (надир), проекция кадра на землю будет прямоугольником, а размеры территории на изображении определяются с помощью формул:

$$W = 2 h \tan \left(\frac{HFOV}{2} \right);$$

$$H = 2 h \tan \left(\frac{VFOV}{2} \right),$$

где h – высота полёта дрона над землёй, HFOV и VFOV – горизонтальный и вертикальный углы обзора камеры в радианах.

Если углы обзора заранее неизвестны, их можно определить через размеры сенсора и фокусное расстояние объектива:

$$HFOV = 2 \arctan \left(\frac{W_s}{2f} \right);$$

$$VFOV = 2 \arctan \left(\frac{H_s}{2f} \right),$$

где W_s и H_s – ширина и высота сенсора камеры, f – фокусное расстояние объектива.

В-третьих, точность прогноза зависит от качества данных и модели прогнозирования. Чем длиннее временной промежуток, тем выше неопределённость из-за изменчивости погодных условий и динамики огня.

В случае подтверждения очага возгорания и определения его потенциальной угрозы система генерирует уведомления для операторов и служб экстренного реагирования, предоставляя информацию о местоположении и прогнозируемом развитии пожара. Оператор имеет возможность приостановить патрулирование, перейдя в ручной режим и задав новую миссию, например, по мониторингу развития обнаруженного возгорания. После чего дрон отправится на координаты, которые передал оператор, и зависнет в воздухе над пожаром. Оператор в любой момент времени патрулирования может получить видеопоток в режиме, приближенном к реальному времени.

Все события, изображения, результаты анализа и прогнозы сохраняются в базе данных для дальнейшего анализа, обучения моделей и отчётности.

Основные модули и подходы к их реализации. Модуль управления дроном – это ключевая часть системы, обеспечивающая автономное и ручное управление беспилотным летательным аппаратом. Данный модуль отвечает за планирование, запуск и сопровождение полётных заданий, а также за контроль за перемещением беспилотных аппаратов в процессе выполнения миссии. Он служит связующим звеном между оператором и системой автономного управления полётом.

Ключевые функции модуля включают в себя:

- ◆ задание маршрута. Оператор формирует маршрут патрулирования, указывая координаты контрольных точек, высоту полёта, приоритетные зоны наблюдения и временные ограничения.

- ◆ автоматический режим. дрон самостоятельно определяет оптимальную траекторию с учётом рельефа, погодных условий и полётных ограничений. Это снижает нагрузку на оператора и позволяет системе гибко адаптироваться к меняющейся обстановке на местности.

- ◆ мониторинг состояния дрона. Отображается информация о текущем статусе аппарата: уровень заряда аккумулятора, координаты по GPS, состояние сенсоров, качество связи и другие критически важные параметры.

- ◆ реакция на пожар. В случае обнаружения очага пожара оператор может приостановить выполнение текущей миссии и вручную изменить маршрут – направив дрон на повторное сканирование зоны возгорания для уточнения координат и масштабов.

- ◆ безопасность. Система отслеживает соблюдение установленных ограничений: запретных зон, минимальной высоты полёта, погодных условий. При отклонениях модуль способен автоматически корректировать маршрут или инициировать возврат на базу. отслеживание и соблюдение ограничений, таких как зоны запрета полётов, метеоусловия и другие.

Технологии и реализация:

- ◆ для управления беспилотными летательными аппаратами планируется использование стандартных API, таких как DJI SDK, PX4 или ArduPilot, которые обеспечивают поддержку как автономных, так и полуавтономных режимов полёта. Эти платформы позволяют реализовать гибкое взаимодействие между дроном и управляющей системой, включая маршрутизацию, задание высоты, контроль скорости и аварийное возвращение на базу.

- ◆ для точного позиционирования и соблюдения заданных траекторий в систему интегрируются данные от GPS, ГЛОНАСС, а также дополнительных навигационных сенсоров. Это позволяет обеспечить стабильное движение по маршруту и корректную реакцию на изменения в окружающей среде.

- ◆ отдельное внимание уделяется реализации адаптивных алгоритмов управления, которые на основе данных с сенсоров могут в реальном времени изменять параметры полёта – например, автоматически повышать высоту при обнаружении препятствий или корректировать маршрут при ухудшении погодных условий.

Модуль детекции пожара отвечает за обработку данных, поступающих с камер и сенсоров, установленных на борту беспилотного аппарата, с целью выявления признаков возгорания – таких как дым, открытое пламя или тепловые аномалии. Его основная задача – быстрое и надёжное обнаружение пожаров на ранних стадиях.

Ключевые функции модуля:

- ♦ обработка изображений. Анализ изображений и видеопотока с оптической камеры дрона для распознавания визуальных признаков пожара: клубов дыма, языков пламени, зон повышенного свечения.

- ♦ использование нейросетевых методов для детекции. Используются обученные модели машинного обучения (например, YOLO, Faster R-CNN), способные быстро и с высокой точностью распознавать огонь и дым на изображениях даже в сложных условиях – при задымлении, неравномерном освещении или частичном перекрытии объектов.

- ♦ тепловизионное обнаружение. Обработка данных с тепловизоров для выявления очагов с аномально высокой температурой, в том числе в тех случаях, когда пламя визуально не наблюдается (например, при сильном задымлении или в ночное время).

- ♦ многоспектральное обнаружение. Анализ изображений, полученных в различных спектральных диапазонах – от видимого света до инфракрасного и ультрафиолетового. Это позволяет повысить точность детекции за счёт выявления невидимых глазу характеристик очага.

- ♦ обработка в режиме, приближенном к реальному времени. Система осуществляет анализ данных на борту или на сервере с минимальной задержкой, формируя уведомление о потенциальном пожаре и передавая его оператору для принятия дальнейших решений.

Технологии и реализация:

- ♦ для обработки визуальных данных в системе используется библиотека OpenCV, обеспечивающая эффективную предварительную обработку изображений, включая масштабирование, коррекцию цветового пространства, применение фильтров и другие операции, необходимые перед подачей данных в модель;

- ♦ обнаружение признаков возгорания реализуется с помощью нейросетевых моделей, обученных на изображениях пожаров. Для обучения и развёртывания таких моделей используется фреймворк TensorFlow, в том числе интеграция архитектуры YOLO (You Only Look Once) – одной из самых популярных моделей для детекции объектов в режиме, приближённом к реальному времени. Благодаря этому алгоритму система способна быстро и точно определять наличие огня и дыма на изображениях;

- ♦ в качестве источников тепловых данных применяются тепловизоры и инфракрасные камеры, например, решения от FLIR, которые позволяют обнаруживать участки с аномально высокой температурой даже при отсутствии видимого пламени – например, в условиях сильного задымления или ночью;

- ♦ дополнительно используются модели машинного обучения, обученные классифицировать и локализовать очаги возгорания по различным признакам, что позволяет значительно повысить общую точность системы и снизить количество ложных срабатываний.

Модуль прогнозирования отвечает за построение моделей распространения огня на основе анализа различных источников данных. В его работу включается обработка информации о температуре воздуха, уровне влажности, скорости и направлении ветра, а также данных с бортовых сенсоров и внешних сервисов – в том числе сведений о рельефе местности, типе растительности и плотности лесного покрова.

Функции модуля:

- ♦ прогнозирование распространения огня. На основе метеорологических данных – таких как температура воздуха, влажность, скорость и направление ветра – а также характеристик местности (тип растительности, рельеф, плотность лесного покрова) модуль строит прогноз распространения огня. Это позволяет оперативно оценивать возможные зоны риска и своевременно принимать меры по их защите;

- ♦ моделирование различных сценариев. Система позволяет формировать и анализировать несколько сценариев развития пожара, включая как наиболее вероятные, так и менее вероятные варианты. Такой подход обеспечивает гибкость в планировании и помогает учитывать влияние переменных факторов;

- ◆ использование машинного обучения. Для повышения точности прогнозов используются обучаемые модели, основанные на анализе исторических данных о пожарах. Эти модели способны выявлять скрытые закономерности в поведении огня, адаптироваться к различным ландшафтным и климатическим условиям и уточнять предсказания по мере поступления новых данных;

- ◆ анализ географической и климатической информации. Для точного пространственного анализа модуль подключается к картографическим сервисам и ГИС-системам. Это позволяет учитывать особенности рельефа, тип местности и другие географические параметры, которые существенно влияют на траекторию и скорость распространения пожара.

Технологии и реализация:

- ◆ для построения прогнозов распространения огня используются различные модели, сочетающие методы машинного обучения и моделирования природных процессов. В частности, применяются нейросетевые архитектуры, такие как рекуррентные нейросети и LSTM-модели, способные обрабатывать временные ряды и учитывать динамику изменений погодных условий, а также данные, поступающие от сенсоров с дронов и наземных источников.

- ◆ для более детализированного моделирования применяется подход агентного моделирования (АВМ), в рамках которого распространение огня представлено в виде взаимодействия множества агентов – локальных участков возгорания. Каждый агент реагирует на внешние факторы, такие как направление ветра, уровень влажности, тип растительности, что позволяет более точно воспроизводить реальные сценарии развития пожара.

- ◆ интеграция с геоинформационными системами (ArcGIS, QGIS) позволяет учитывать сложный рельеф, структуру ландшафта и плотность растительного покрова, что критически важно для построения достоверных пространственных прогнозов;

- ◆ разработка и обучение моделей осуществляется с использованием современных фреймворков машинного обучения, таких как Python, TensorFlow и PyTorch, что обеспечивает гибкость в построении архитектуры и масштабируемость решений.

Модуль связи является неотъемлемой частью системы и обеспечивает обмен данными между дроном и центральной системой.

Функции модуля:

- ◆ передача данных с дронов. Модуль обеспечивает передачу ключевой информации с беспилотных аппаратов на центральный сервер. Это включает изображения, видеопотоки, телеметрию и данные с бортовых сенсоров, необходимые для последующей обработки и анализа;

- ◆ взаимодействие с внешними API. Реализовано взаимодействие с внешними API – метеорологическими и геоинформационными платформами, службами экстренного реагирования, а также ГИС-системами. Это позволяет в режиме реального времени получать актуальные данные об обстановке, погодных условиях и состоянии местности;

- ◆ мониторинг качества связи. Система постоянно отслеживает параметры соединения – уровень сигнала, скорость передачи, стабильность канала – и при необходимости автоматически переключается между доступными технологиями связи, такими как радиоканал, LTE, спутниковая связь или Mesh-сети;

- ◆ резервирование связи. Для повышения надёжности предусмотрено использование нескольких каналов связи. Это позволяет обеспечить устойчивую передачу данных даже при временных перебоих или ухудшении качества соединения в отдельных зонах покрытия.

Технологии и реализация:

- ◆ для обеспечения устойчивой и быстрой передачи данных в режиме, приближенном к реальному времени, используется протокол MQTT и WebSocket-соединения, позволяющие организовать лёгкий и надёжный обмен информацией между дроном и серверной частью системы. Эти технологии обеспечивают двустороннюю связь с минимальной задержкой, что критически важно для управления и обработки видеопотоков, телеметрии и сигналов тревоги;

- ◆ передача данных в удалённых и труднодоступных регионах осуществляется через различные каналы связи: радиоканал, LTE, 5G, а также спутниковые коммуникационные платформы, что обеспечивает гибкость и отказоустойчивость системы в условиях нестабильного покрытия;

- ◆ дополнительно модуль реализует интеграцию с внешними API, включая метеорологические и геоинформационные сервисы. Это позволяет автоматически получать актуальные погодные данные, которые используются в модулях прогнозирования и адаптации полётных заданий. Пользовательский интерфейс (UI) обеспечивает доступ к системе для разных категорий пользователей – операторов дронов, сотрудников экстренных служб и аналитиков.

Функции модуля:

- ◆ визуализация данных. Интерфейс позволяет в режиме реального времени отображать на карте местоположение дронов, зоны активного наблюдения, маршруты патрулирования и зафиксированные очаги возгорания. Дополнительно могут отображаться зоны риска, предсказанные системой прогнозирования;

- ◆ уведомления и оповещения. Пользователь получает оперативные уведомления о критических событиях – появлении новых очагов, изменении погодных условий, потере сигнала или других инцидентах, требующих вмешательства;

- ◆ контроль дронов. В интерфейс встроены функционал ручного и полуавтоматического управления полётом. Оператор может задавать маршрут, корректировать высоту, приостанавливать выполнение миссии или переключаться на ручной режим при необходимости;

- ◆ прогнозирование и анализ. Отображаются прогнозируемые траектории распространения огня, зоны потенциального риска, а также аналитические данные, полученные от системы обработки и моделирования.

Технологии и реализация:

- ◆ для фронтенд-разработки интерфейса используются современные веб-фреймворки, такие как React или Vue.js, что позволяет создавать отзывчивые и удобные интерфейсы для разных типов устройств, включая планшеты и рабочие станции;

- ◆ интерактивная карта реализуется с помощью интеграции с картографическими платформами: Google Maps API, Leaflet, OpenLayers и другими, обеспечивающими гибкую визуализацию пространственных данных;

- ◆ серверная логика взаимодействия с backend-частью реализована на базе Node.js или Python Flask, что обеспечивает быструю обработку запросов, взаимодействие с API модулей и поддержку многопользовательского доступа с разграничением прав.

Заключение. В данной статье был представлен обзор современных решений для мониторинга и прогнозирования природных пожаров, с акцентом на использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), спутниковых данных и искусственного интеллекта. Мы рассмотрели как традиционные методы, так и инновационные подходы, которые активно применяются и развиваются в сфере мониторинга чрезвычайных ситуаций, относящихся к пожарам.

Спутниковые системы, несмотря на свои преимущества в покрытии больших территорий, сталкиваются с ограничениями, связанными с частотой обновлений и разрешением данных. Эти системы эффективны для мониторинга в крупном масштабе, но для оперативного реагирования в режиме, приближенном к реальному времени их возможностей недостаточно.

Технологии, основанные на БПЛА, предоставляют значительные преимущества с точки зрения мобильности и маневренности, позволяя оперативно реагировать на возникновение пожаров в труднодоступных районах. Тем не менее, эти решения также имеют свои недостатки, такие как ограниченность по времени полета и затратам на инфраструктуру.

Внедрение искусственного интеллекта в анализ данных, получаемых с БПЛА и спутников, значительно улучшает точность и оперативность обнаружения пожаров. Системы машинного обучения, такие как YOLO и Faster R-CNN, уже активно используются для детекции объектов, таких как огонь и дым, в режиме, приближенном к реальному времени. Однако проблемы с ложными срабатываниями и необходимостью валидации остаются актуальными.

Несмотря на достижения в этих областях, комплексная система, концепция которой была рассмотрена в статье, пока не существует в полной мере ни в России и странах СНГ, ни в западных и азиатских странах. Хотя отдельные компоненты, такие как БПЛА для мониторинга и ИИ для анализа данных, уже активно используются, интегрированного решения, которое бы объединяло все элементы (управление дронами, прогнозирование распространения огня в режиме, приближенном к реальному времени, передача данных и взаимодействие с экстренными службами), на данный момент нет. Эта концепция представляет собой новый подход, который может стать прорывной технологией для борьбы с природными катастрофами.

Таким образом, внедрение такой системы будет способствовать не только сохранению природы и экосистем, но и снижению ущерба для экономики, предотвращению разрушений инфраструктуры, а также спасению жизней людей в условиях природных катастроф.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Всемирная метеорологическая организация (ВМО). В бюллетене ВМО по качеству воздуха и климата внимание уделяется воздействиям лесных пожаров / Всемирная Метеорологическая организация. – 2022. – URL: <https://goo.su/gCGr> (дата обращения: 07.03.2025).
2. Организация Объединённых Наций. Ежегодно в мире пожары уничтожают более 350 миллионов гектаров лесных угодий / Организация Объединённых Наций. – 2010. – URL: <https://goo.su/89s9zTt> (дата обращения: 07.03.2025).
3. Akay A.E., Wing M.G., Büyüksakallı H., Malkoçoğlu S. Evaluation of fire lookout towers using GIS-based spatial visibility and suitability analyzes // *Baltic Forestry*. – 2020. – Vol. 144, No. 5–6. – URL: <https://doi.org/10.31298/sl.144.5-6.5> (дата обращения: 05.06.2025).
4. NASA. Спутник Landsat 8. – URL: <https://goo.su/zytsZZX> (дата обращения: 17.03.2025).
5. ScanEx. Terra, Aqua/MODIS. – URL: <https://goo.su/FVHXsh> (дата обращения: 23.03.2025).
6. Innoter. Спутники Sentinel-2A и Sentinel-2B. – URL: <https://goo.su/kWXDS> (дата обращения: 02.04.2025).
7. Adewunmi D., Adelusi J.B. Analyzing Satellite Data for Environmental Monitoring and Disaster Management. – 2024. – URL: <https://goo.su/8pMG8> (дата обращения: 03.05.2025).
8. Главное управление МЧС России по Тульской области. Мониторинг лесопожарной обстановки на контроле спасателей. – URL: <https://goo.su/ITln1mt> (дата обращения: 05.04.2025).
9. Альбатрос. Мониторинг лесных пожаров с БПЛА. – URL: <https://goo.su/gKmwaw> (дата обращения: 06.04.2025).
10. Главное управление МЧС России по Калининградской области. Техника МЧС России: беспилотные авиационные системы. – URL: <https://goo.su/IUDLE> (дата обращения: 17.04.2025).
11. Беспилотные «Стрелы» вертолетного типа // *Стрела*. – 10.10.2021. – URL: <https://goo.su/dFht> (дата обращения: 04.06.2025).
12. Главное управление МЧС России по Республике Саха (Якутия). На вооружении МЧС России – разведывательный беспилотник «Орлан-10». – URL: <https://goo.su/nvp4Szt> (дата обращения: 16.04.2025).
13. GJR Publication. Various Types of Sensors are Used for Forest Fires Detection. – 2025. – URL: <https://goo.su/2OaUruS> (дата обращения: 05.06.2025).
14. Srujan H.R., Srushti S.M., Gowda S.H., Sudhakara H.M. Forest Fire Detection using Optimized Solar Powered Zigbee Wireless Sensor Networks // *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*. – 2024. – December. – URL: <https://doi.org/10.48175/IJAR SCT-22808> (дата обращения: 05.06.2025).
15. Indradjad A., Sunarmodo W., Salyasari N. Development of National Forest/Land Fire Monitoring System Using Remote Sensing Satellite Data (Terra/Aqua MODIS and SNPP) by Automation and Nearly Real-time // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 280, No. 1. – URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/280/1/012032> (дата обращения: 03.05.2025).
16. Проект «Стрекоза» – летающая пожарная машина (БПЛА) // Национальная технологическая инициатива. – URL: <https://goo.su/Av3UU> (дата обращения: 06.06.2025).
17. Проект «Стрекоза»: летающая пожарная машина (БПЛА) // Университет 2035. – URL: <https://pt.2035.university/project/proekt-strekoza-letausaa-pozarna-masina-bpla> (дата обращения: 06.06.2025).
18. Закавин А., Страхов Д. «Оперативный подход»: как новые БПЛА «Стрекоза» могут облегчить работу российских пожарных // *RT на русском*. – 2024. – URL: <https://russian.rt.com/russia/article/1286390-bpla-pozhar-strekoza-nti> (дата обращения: 06.06.2025).

19. Geosolut. Мониторинг лесных угодий с применением БПЛА // Официальный сайт компании Geosolut. – URL: <https://goo.su/GSsl> (дата обращения: 07.06.2025).
20. Geoscan. Создан первый отечественный комплекс для видеомониторинга пожарной обстановки с беспилотника в режиме реального времени. – URL: <https://goo.su/LP37Ex> (дата обращения: 17.04.2025).
21. Центр беспилотных транспортных систем национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ". Инновационная технология с использованием беспилотных летательных аппаратов способствует раннему выявлению лесных пожаров. – URL: <https://goo.su/w8y18R2> (дата обращения: 05.04.2025).
22. NASA Science Editorial Team. Through Smoke and Fire, NASA Searches for Answers // NASA. – 2019. – URL: <https://goo.su/xDDWQW> (дата обращения: 23.04.2025).
23. Lee S.J.J., Oh J., Choi J. Improved Fire Recognition in VTOL UAVs through Convolutional Neural Network Algorithms // Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Natural Language Processing. – 2025. – URL: <https://doi.org/10.5121/csit.2025.150907> (дата обращения: 03.06.2025).
24. Yandouzi M., Mohammed B., Grari M., Boukabous M., Moussaoui O., Azizi M., Ghoumid K., Elmiaid A.K. Semantic segmentation and thermal imaging for forest fires detection and monitoring by drones // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2024. – Vol. 13, No. 4. – URL: <https://doi.org/10.11591/eei.v13i4.7663> (дата обращения: 03.06.2025).
25. Li X., Wang X., Sun S., Wang Y., Li S., Li D. Predicting the Wildland Fire Spread Using a Mixed-Input CNN Model with Both Channel and Spatial Attention Mechanisms // Fire Technology. – 2023. – Vol. 59, No. 3. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01427-2> (дата обращения: 03.06.2025).
26. Ranjani D., Santhi S. An Optimized Deep Learning Framework for Early Detection and Prevention of Forest Fires Using Advanced Training Techniques. – 2025. – URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6734052/v1> (дата обращения: 03.06.2025).
27. Rahman H.I., Saad A.F., Yani A. Drone Based Fire Detection System Based on Convolutional Neural Network // International Journal of Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 11, No. 1. – P. 26-36. – URL: <https://doi.org/10.36079/lamintang.ijai-01101.669> (дата обращения: 25.05.2025).
28. Kurasinski L., Tan J., Malekian R. Using Neural Networks to Detect Fire from Overhead Images // Wireless Personal Communications. – 2023. – Vol. 130, No. 17. – P. 1-21. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10321-7> (дата обращения: 03.06.2025).
29. Evolonc GmbH. – URL: <https://evolonc.de/> (дата обращения: 07.06.2025).
30. Liu P., Zhang G. A Case Study on the Integration of Remote Sensing for Predicting Complicated Forest Fire Spread // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, No. 21. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs16213969> (дата обращения: 03.06.2025).
31. Ning J., Liu H., Yu W., Deng J., Sun L., Yang G., Wang M., Yu H. Comparison of Different Models to Simulate Forest Fire Spread: A Case Study // Forests. – 2024. – Vol. 15, No. 3. – URL: <https://doi.org/10.3390/f15030563> (дата обращения: 03.06.2025).
32. Meng Q., Lu H., Huai Y., Xu H., Yang S. Forest Fire Spread Simulation and Fire Extinguishing Visualization Research // Forests. – 2023. – Vol. 14, No. 7. – URL: <https://doi.org/10.3390/f14071371> (дата обращения: 04.06.2025).
33. Shadrin D., Illarionova S., Gubanov F. et al. Wildfire spreading prediction using multimodal data and deep neural network approach // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14, No. 2606. – URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52821-x> (дата обращения: 25.04.2025).
34. Pang B., Cheng S., Huang Y., Jin Y., Guo Y., Prentice I.C., Harrison S.P., Arcucci R. Fire-Image-DenseNet (FIDN) for predicting wildfire burnt area using remote sensing data // Computers & Geosciences. – 2025. – Vol. 195. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105783> (дата обращения: 03.05.2025).
35. Shaddy B., Ray D., Farguell A., Calaza V., Mandel J., Haley J., Hilburn K., Mallia D.V., Kochanski A., Oberai A. Generative Algorithms for Fusion of Physics-Based Wildfire Spread Models with Satellite Data for Initializing Wildfire Forecasts // Artificial Intelligence for the Earth Systems. – 2024. – Vol. 3, No. 3. – URL: <https://doi.org/10.1175/AIES-D-23-0087.1> (дата обращения: 08.06.2025).
36. Kale M., Meher S.S., Chavan M., Kumar V. et al. Operational Forest-Fire Spread Forecasting Using the WRF-SFIRE Model // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, No. 13. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs16132480> (дата обращения: 07.06.2025).
37. Gill F., Valencia A., Baker G. Prescribed Burns and UAV Drone Analysis: Towards a Coupled Wind-Fire Spread Model // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2885, No. 1. – URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2885/1/012071> (дата обращения: 07.06.2025).
38. Huang Y., Li J., Zheng H. Modeling of Wildfire Digital Twin: Research Progress in Detection, Simulation, and Prediction Techniques // Fire. – 2024. – Vol. 7, No. 11. – URL: <https://doi.org/10.3390/fire7110412> (дата обращения: 07.06.2025).

39. NASA Science Editorial Team. NASA Wildfire Digital Twin Pioneers New AI Models and Streaming Data Techniques for Forecasting Fire and Smoke // NASA Science. – 2024. – URL: <https://goo.su/41cxT> (дата обращения: 07.06.2025).
40. *Chen J., Yang Y.* Measuring Fire Spread Rate with Digital Image Processing Method // In: Computational and Experimental Simulations in Engineering. – 2023. – P. 257-267. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42987-3_19 (дата обращения: 04.06.2025).
41. *Andrews P.L.* The Rothermel Surface Fire Spread Model and Associated Developments: A Comprehensive Explanation // Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-371. – Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station; 2018. – URL: <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-371> (дата обращения: 08.06.2025).
42. Лесные стражи: как создаются российские беспилотники для борьбы с природными пожарами // Научная Россия. – 2025. – URL: <https://goo.su/2Wejwz> (дата обращения: 05.06.2025).

REFERENCES

1. Vsemirnaya meteorologicheskaya organizatsiya (VMO). V byulletene VMO po kachestvu vozdukhа i klimata vniimanie udelyaetsya vozdeystviyam lesnykh pozharov [World Meteorological Organisation (WMO). WMO Air Quality and Climate Bulletin focuses on the impacts of wildfires], World Meteorological Organisation, 2022. Available at: <https://goo.su/gCGr> (accessed 07 March 2025).
2. Organizatsiya Ob'edinennykh Natsiy. Ezhegodno v mire pozhary unichtozhayut bolee 350 millionov gektarov lesnykh ugodiy [United Nations Organisation. Every year in the world fires destroy more than 350 million hectares of forest land], United Nations, 2010. Available at: <https://goo.su/89s9zTt> (accessed 07 March 2025).
3. *Akay A.E., Wing M.G., Büyüksakallı H., Malkoçoglu S.* Evaluation of fire lookout towers using GIS-based spatial visibility and suitability analyzes, *Baltic Forestry*, 2020, Vol. 144, No. 5–6. Available at: <https://doi.org/10.31298/sl.144.5-6.5> (accessed 05 June 2025).
4. NASA. Sputnik Landsat 8 [NASA. Landsat 8 satellite]. Available at: <https://goo.su/zytsZZX> (accessed 17 March 2025).
5. ScanEx. Terra, Aqua/MODIS. Available at: <https://goo.su/FVHXsh> (accessed 23 March 2025).
6. Innoter. Спутники Sentinel-2A и Sentinel-2B. Available at: <https://goo.su/kWXDS> (accessed 02 April 2025).
7. *Adewunmi D., Adelusi J.B.* Analyzing Satellite Data for Environmental Monitoring and Disaster Management, 2024. Available at: <https://goo.su/8pMG8> (accessed 03 May 2025).
8. Glavnoe upravlenie MChS Rossii po Tul'skoy oblasti. Monitoring lesopozharnoy obstanovki na kontrole spasateley [Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the Tula Region. Monitoring of forest fire situation on the control of rescuers]. Available at: <https://goo.su/ITln1mt> (accessed 05 April 2025).
9. Al'batros. Monitoring lesnykh pozharov s BPLA [Albatross. Monitoring of forest fires from UAVs]. Available at: <https://goo.su/gKmaw> (accessed 06 April 2025).
10. Glavnoe upravlenie MChS Rossii po Kaliningradskoy oblasti. Tekhnika MChS Rossii: bespilotnye aviatsionnye sistemy [Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Kaliningrad Region. Technique of the Russian Emergencies Ministry: unmanned aerial systems]. Available at: <https://goo.su/IUDLE> (accessed 17 April 2025).
11. Bespilotnye «Strely» vertoletnogo tipa [Unmanned “Arrows” of helicopter type], Arrow. 10.10.2021. Available at: <https://goo.su/dFht> (accessed 04 June 2025).
12. Glavnoe upravlenie MChS Rossii po Respublike Sakha (Yakutiya). Na vooruzhenii MChS Rossii – razvedyvatel'nyy bespilotnik «Orlan-10» [Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Republic of Sakha (Yakutia). The Orlan-10 reconnaissance drone is in service with the Russian Ministry of Emergency Situations]. Available at: <https://goo.su/nvp4Szt> (accessed 16 April 2025).
13. GJR Publication. Various Types of Sensors are Used for Forest Fires Detection, 2025. Available at: <https://goo.su/2OaUruS> (accessed 05 June 2025).
14. *Srujan H.R., Srushiti S.M., Gowda S.H., Sudhakara H.M.* Forest Fire Detection using Optimized Solar Powered Zigbee Wireless Sensor Networks, *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*, 2024. December. Available at: <https://doi.org/10.48175/IJARST-22808> (accessed 05 June 2025).
15. *Indradjad A., Sunarmodo W., Salyasari N.* Development of National Forest/Land Fire Monitoring System Using Remote Sensing Satellite Data (Terra/Aqua MODIS and SNPP) by Automation and Nearly Real-time, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 280, No. 1. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/280/1/012032> (accessed 03 May 2025).

16. Proekt «Strekoza» – letayushchaya pozharaya mashina (BPLA) [Project “Strekoza” – flying fire engine (UAV)], National Technological Initiative. Available at: <https://goo.su/Av3UU> (accessed 06 June 2025).
17. Proekt «Strekoza»: letayushchaya pozharaya mashina (BPLA) [Project “Strekoza”: flying fire-fighting vehicle (UAV)], University 2035. Available at: <https://pt.2035.university/project/proekt-strekoza-letausaa-pozarna-masina-bpla> (accessed 06 June 2025).
18. Zakvasin A., Strakhov D. «Operativnyy podkhod»: kak novye BPLA «Strekoza» mogut oblegchit' rabotu rossiyskikh pozharnykh [“Operational Approach”: How the new Strekoza UAVs can facilitate the work of Russian firefighters], RT in Russian, 2024. Available at: <https://russian.rt.com/russia/article/1286390-bpla-pozhar-strekoza-nti> (accessed 04 June 2025).
19. Geosalut. Monitoring lesnykh ugodiy s primeneniem BPLA [Geosalut. Monitoring of forest lands using UAVs], Company’s official website Geosalut. Available at: <https://goo.su/GSsl> (accessed 07 June 2025).
20. Geoscan. Sozdan pervyy otechestvennyy kompleks dlya videomonitoringa pozharoy obstanovki s bespilotnika v rezhime real'nogo vremeni. Available at: <https://goo.su/LP37Ex> (accessed 17 April 2025).
21. Tsentr bespilotnykh transportnykh sistem natsional'nyy issledovatel'skiy yadernyy universitet "MIFI". Innovatsionnaya tekhnologiya s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov sposobstvuet rannemu vyyavleniyu lesnykh pozharov. Available at: <https://goo.su/w8y18R2> (accessed 05 April 2025).
22. NASA Science Editorial Team. Through Smoke and Fire, NASA Searches for Answers, NASA, 2019. Available at: <https://goo.su/xDDWQW> (accessed 23 April 2025).
23. Lee S.J.J., Oh J., Choi J. Improved Fire Recognition in VTOL UAVs through Convolutional Neural Network Algorithms, *Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Natural Language Processing*, 2025. Available at: <https://doi.org/10.5121/csit.2025.150907> (accessed 03 June 2025).
24. Yandouzi M., Mohammed B., Grari M., Boukabous M., Moussaoui O., Azizi M., Ghoumid K., Elmiad A.K. Semantic segmentation and thermal imaging for forest fires detection and monitoring by drones, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 2024, Vol. 13, No. 4. Available at: <https://doi.org/10.11591/eei.v13i4.7663> (accessed 03 June 2025).
25. Li X., Wang X., Sun S., Wang Y., Li S., Li D. Predicting the Wildland Fire Spread Using a Mixed-Input CNN Model with Both Channel and Spatial Attention Mechanisms, *Fire Technology*, 2023, Vol. 59, № 3. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01427-2> (accessed 03 June 2025).
26. Ranjani D., Santhi S. An Optimized Deep Learning Framework for Early Detection and Prevention of Forest Fires Using Advanced Training Techniques, 2025. Available at: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6734052/v1> (accessed 03 June 2025).
27. Rahman H.I., Saad A.F., Yani A. Drone Based Fire Detection System Based on Convolutional Neural Network, *International Journal of Artificial Intelligence*, 2024, Vol. 11, No. 1, pp. 26-36. Available at: <https://doi.org/10.36079/lamintang.ijai-01101.669> (accessed 25 May 2025).
28. Kurasinski L., Tan J., Malekian R. Using Neural Networks to Detect Fire from Overhead Images, *Wireless Personal Communications*, 2023, Vol. 130, No. 17, pp. 1-21. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10321-7> (accessed 03 June 2025).
29. Evolonik GmbH. – URL: <https://evolonic.de/> (accessed 07 June 2025).
30. Liu P., Zhang G. A Case Study on the Integration of Remote Sensing for Predicting Complicated Forest Fire Spread, *Remote Sensing*, 2024, Vol. 16, No. 21. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs16213969> (accessed 03 June 2025).
31. Ning J., Liu H., Yu W., Deng J., Sun L., Yang G., Wang M., Yu H. Comparison of Different Models to Simulate Forest Fire Spread: A Case Study, *Forests*, 2024, Vol. 15, No. 3. Available at: <https://doi.org/10.3390/f15030563> (accessed 03 June 2025).
32. Meng Q., Lu H., Huai Y., Xu H., Yang S. Forest Fire Spread Simulation and Fire Extinguishing Visualization Research, *Forests*, 2023, Vol. 14, No. 7. Available at: <https://doi.org/10.3390/f14071371> (accessed 04 June 2025).
33. Shadrin D., Illarionova S., Gubanov F. et al. Wildfire spreading prediction using multimodal data and deep neural network approach, *Scientific Reports*, 2024, Vol. 14, No. 2606. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52821-x> (accessed 25 April 2025).
34. Pang B., Cheng S., Huang Y., Jin Y., Guo Y., Prentice I.C., Harrison S.P., Arcucci R. Fire-Image-DenseNet (FIDN) for predicting wildfire burnt area using remote sensing data, *Computers & Geosciences*, 2025, Vol. 195. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105783> (accessed 03 May 2025).
35. Shaddy B., Ray D., Farguell A., Calaza V., Mandel J., Haley J., Hilburn K., Mallia D.V., Kochanski A., Oberai A. Generative Algorithms for Fusion of Physics-Based Wildfire Spread Models with Satellite Data for Initializing Wildfire Forecasts, *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2024, Vol. 3, No. 3. Available at: <https://doi.org/10.1175/AIES-D-23-0087.1> (accessed 08 June 2025).

36. Kale M., Meher S.S., Chavan M., Kumar V. et al. Operational Forest-Fire Spread Forecasting Using the WRF-SFIRE Model, *Remote Sensing*, 2024, Vol. 16, No. 13. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs16132480> (accessed 07 June 2025).
37. Gill F., Valencia A., Baker G. Prescribed Burns and UAV Drone Analysis: Towards a Coupled Wind-Fire Spread Model, *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, Vol. 2885, No. 1. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2885/1/012071> (accessed 07 June 2025).
38. Huang Y., Li J., Zheng H. Modeling of Wildfire Digital Twin: Research Progress in Detection, Simulation, and Prediction Techniques, *Fire*, 2024, Vol. 7, No. 11. Available at: <https://doi.org/10.3390/fire7110412> (accessed 07 June 2025).
39. NASA Science Editorial Team. NASA Wildfire Digital Twin Pioneers New AI Models and Streaming Data Techniques for Forecasting Fire and Smoke, *NASA Science*, 2024. Available at: <https://goo.su/41cxT> (accessed 07 June 2025).
40. Chen J., Yang Y. Measuring Fire Spread Rate with Digital Image Processing Method, *In: Computational and Experimental Simulations in Engineering*, 2023, P. 257-267. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42987-3_19 (accessed 04 June 2025).
41. Andrews P.L. The Rothermel Surface Fire Spread Model and Associated Developments: A Comprehensive Explanation, *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-371*. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station; 2018. Available at: <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-371> (accessed 08 June 2025).
42. Lesnye strazhi: kak sozdayutsya rossiyskie bespilotniki dlya bor'by s prirodnyimi pozharemi [Forest guards: how Russian drones are created to fight natural fires], *Nauchnaya Rossiya* [Scientific Russia], 2025. Available at: <https://goo.su/2Wejwz> (accessed 05 June 2025).

Болдырев Николай Дмитриевич – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: boldyrev.nickolay@yandex.ru; г. Волгоград, Россия; тел.: +79199877651; кафедра программного обеспечения автоматизированных систем; студент.

Гилка Вадим Викторович – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: gilka_vv@mail.ru; г. Волгоград, Россия; тел.: +79996247154; кафедра программного обеспечения автоматизированных систем; к.т.н.; старший преподаватель.

Кузнецова Агнесса Сергеевна – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: agnessakyz@yandex.ru; г. Волгоград, Россия; тел.: +79275174399; кафедра программного обеспечения автоматизированных систем; старший преподаватель.

Морозов Дмитрий Александрович – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: dimka5rus@yandex.ru; г. Волгоград, Россия; тел.: +79823643521; кафедра программного обеспечения автоматизированных систем; студент.

Boldyrev Nikolay Dmitrievich – Volgograd State Technical University; e-mail: boldyrev.nickolay@yandex.ru; Volgograd, Russia; tel.: +79199877651; the Department of Software for Automated Systems; student.

Gilka Vadim Viktorovich – Volgograd State Technical University; e-mail: gilka_vv@mail.ru; Volgograd, Russia; tel.: +79996247154; the Department of Software for Automated Systems; Candidate of Technical Sciences; Senior Lecturer.

Kuznetsova Agnessa Sergeevna – Volgograd State Technical University; e-mail: agnessakyz@yandex.ru; Volgograd, Russia; tel.: +79275174399; the Department of Software for Automated Systems; Senior Lecturer.

Morozov Dmitry Alexandrovich – Volgograd State Technical University; e-mail: dimka5rus@yandex.ru; Volgograd, Russia; tel.: +79823643521; the Department of Software for Automated Systems; student.

И.А. Бондин**МЕТОДИКА КУСОЧНОЙ АППРОКСИМАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОЛИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОГО
ЗАЛЕГАНИЯ**

Рассматривается задача описания статических характеристик гидролитосферных процессов в глубокозалегающих водоносных горизонтах на примере Эссентукского месторождения минеральных подземных вод, относящегося к IV категории сложности по действующей классификации. Показано, что классические методы аппроксимации распределённых звеньев, широко применяемые при исследовании и проектировании систем управления для верхних водоносных горизонтов глубиной 50–400 м, оказываются непригодными для условий глубокого залегания. Это связано с высокой газонасыщенностью вод, выраженной структурной неоднородностью коллекторов, сложной и нередко нелинейной гидравлической связью между эксплуатационными и наблюдательными скважинами, а также пространственно-временной изменчивостью гидрохимических параметров. Предложена модифицированная методика кусочной аппроксимации статических характеристик гидролитосферных процессов, основанная на раздельном определении параметров аппроксимирующих звеньев на отдельных интервалах расстояний между скважинами по результатам опытно-фильтрационных работ. Методика апробирована для Сеноман–Маастрихтского водоносного горизонта Новоблагодарненского участка Эссентукского месторождения, для которого рассчитаны коэффициенты гидравлического взаимодействия скважин и построены статические передаточные функции для различных пространственных интервалов с учётом реальных геолого-фильтрационных условий. Показано, что использование кусочной аппроксимации обеспечивает более согласованное с экспериментальными данными описание статических характеристик по сравнению с однородными моделями и позволяет учитывать пространственную изменчивость фильтрационных свойств среды. Полученные результаты формируют методическую основу для прогнозирования гидродинамических и газогидрохимических изменений, оценки устойчивости эксплуатационных режимов, а также для разработки и синтеза систем управления дебитами глубоких скважин минеральных подземных вод. Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенной методики при обосновании параметров опытно-промышленной эксплуатации, корректировке проектных решений, интерпретации данных режимных наблюдений и опытно-фильтрационных работ, а также при формировании научно обоснованных рекомендаций по управлению водоотбором, снижению техногенных возмущений и сохранению устойчивости гидролитосферных систем в условиях интенсивного освоения месторождений.

Гидролитосферные процессы; минеральные подземные воды; Эссентукское месторождение; Сеноман–Маастрихтский водоносный горизонт; опытно-фильтрационные работы; коэффициент гидравлического взаимодействия; кусочная аппроксимация.

I.A. Bondin**THE METHOD OF PIECEWISE APPROXIMATION OF STATIC
CHARACTERISTICS OF DEEP-LYING HYDROLITHOSPHERIC PROCESSES**

This paper addresses the problem of describing the static characteristics of hydrolithospheric processes in deep-lying aquifers using the Essentuki mineral groundwater field, classified as a Category IV deposit in terms of geological complexity, as a case study. It is shown that classical methods for approximating distributed transfer functions, widely applied in the analysis and design of control systems for shallow aquifers at depths of 50–400 m, are not applicable to deep-lying conditions. This limitation is caused by high gas saturation of groundwater, pronounced structural heterogeneity of reservoirs, complex and often nonlinear hydraulic interaction between production and observation wells, as well as spatial and temporal variability of hydrochemical parameters. A modified method of piecewise approximation of static characteristics of hydrolithospheric processes is proposed. The method is based on the separate identification of parameters of approximating elements over individual distance intervals between wells using the results of pumping tests. The approach was implemented for the Cenomanian–Maastrichtian aquifer of the Novoblagodarnensky area of the Essentuki field, where hydraulic interaction coefficients between wells were calculated and static transfer functions were constructed for different spatial intervals, taking into account actual geological and filtration conditions. The results demonstrate that the use of piecewise approximation provides a better agreement with experimental data compared to homogeneous models and allows spatial variability of filtration properties to be taken into account. The obtained results form a methodological basis for forecasting hydrodynamic and gas–hydrochemical changes, assessing the stability of operating regimes, and developing and synthesizing control systems for regulating discharge rates

of deep mineral groundwater wells. The practical significance of the study lies in the applicability of the proposed method to substantiating pilot industrial operation parameters, adjusting design solutions, interpreting monitoring and pumping test data, and formulating scientifically grounded recommendations for groundwater abstraction management, reduction of technogenic disturbances, and preservation of the stability of hydrolithospheric systems under conditions of intensive field development.

Hydrolithospheric processes; mineral groundwater; Essentuki field; Cenomanian–Maastrichtian aquifer; pumping tests; hydraulic interaction coefficient; piecewise approximation.

Введение. Объект исследования расположен на юге Европейской части России, в центральной части Предкавказья, в пределах региона Кавказские Минеральные Воды (КМВ) Ставропольского края. Район КМВ является старейшим курортным регионом России и обладает уникальной гидроминеральной базой, включающей 24 месторождения и участка минеральных подземных вод [1, 2]. Особое значение имеют углекислые воды хлоридно-гидрокарбонатного натриевого состава типов «Ессентуки № 4» и «Ессентуки № 17», развитые в дат–зеландском и сеноман–маастрихтском водоносных горизонтах [2–4].

В связи с развитием курортной инфраструктуры и ростом потребности в минеральных водах усиливается освоение водоносных горизонтов более глубокого залегания. Это сопровождается проявлением новых для региона факторов: высокого газового насыщения, сложной (часто незакономерной) гидравлической связи между скважинами, изменения гидрохимических характеристик. Эти особенности фиксируются, в частности, по результатам опытно-фильтрационных работ (ОФР) на Новоблагодарненском участке Ессентукского месторождения.

Согласно действующей классификации запасов минеральных подземных вод [Классификация..., приказ Минприроды России № 195], месторождения КМВ отнесены к IV категории сложности, что накладывает ограничения на использование математического аппарата при исследовании гидролитосферных процессов и требует применения плоских моделей в цилиндрических координатах [5–11].

Цель работы – разработать модифицированную методику кусочной аппроксимации статических характеристик гидролитосферных процессов в глубокозалегających водоносных горизонтах по результатам ОФР, обеспечивающую более адекватное описание гидравлического взаимодействия скважин в условиях структурной неоднородности.

Новизна работы. Впервые предложена модифицированная методика кусочной аппроксимации статических, а в дальнейшем и динамических характеристик гидролитосферных процессов, позволяющая:

1. Описать статическую передаточную функцию гидролитосферного процесса в горизонтах глубокого залегания, где известные ранее методы описания (уравнениями в частных производных, уравнениями, использующими цилиндрические координаты и др. [8]) не применимы.

2. Учитывать неоднородности среды и пространственную изменчивость параметров, что невозможно в рамках классических моделей [8].

3. По результатам ОФР при ограниченном числе наблюдательных скважин, удается описать взаимодействия скважин, расположенных в рассматриваемом горизонте глубокого залегания и построить модели, позволяющие прогнозировать развития гидролитосферных процессов на близкую и дальнюю перспективы (изменение гидродинамических процессов и газогеохимических составов добываемого гидроминерального сырья).

Материалы и методы. Исследования выполнены на Новоблагодарненском участке Ессентукского месторождения углекислых минеральных вод, приуроченном к сеноман–маастрихтскому водоносному горизонту. Расположение эксплуатационных и наблюдательных скважин (1-бис-Э, 2-бис-Э, 49-Э, 46-Э) приведено на схеме (рис. 1).

По результатам ОФР получены понижения уровня в наблюдательных скважинах (табл. 1), на основании которых вычислены статические коэффициенты передачи:

$$K_i = \frac{\Delta h_i}{Q}, i = 1, \dots, 4. \quad (1)$$

где Δh_i – понижение уровня в i -й скважине, при дебите скважины № 1-бис-Э; $Q = 65 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Таблица 1

Параметры исследования Сеноман-Маастрихтского водоносного горизонта

Дебит скв. №1-бис-Э (м ³ /сут.)	Понижение уровня в скв. № 1-бис-Э (м.)	Понижение уровня в скв. № 2-бис-Э (м.)	Понижение уровня в скв. № 49-Э (м.)	Понижение уровня в скв. № 46-бис (м.)
65	45	12	7	10
Статические коэффициенты передачи				
	$K_1=45/65=0.6923$	$K_2=12/65=0.1846$	$K_3=7/65=0.1077$	$K_4=10/65=0.1538$

Базовая математическая модель. Для описания статических характеристик гидролитосферных процессов используется аппроксимирующее распределённое звено с сосредоточенным управляющим воздействием [8, 11, 12] (статический коэффициент передачи, учитывающий различные коэффициенты фильтрации по пространственным координатам):

$$W(x, y) = \frac{K}{\beta} \cdot \exp\left(-\beta \cdot (x^2 + (K_n \cdot y)^2)^{0.5}\right); \beta = (D)^{1/2}, \quad (2)$$

где $W(x, y)$ – статический коэффициент гидравлического взаимодействия скважин, определяемый с использованием ОФР; x, y – пространственные координаты; D, K – определяемые параметры K_n – добавочный параметр, учитывающий различные коэффициенты фильтрации по пространственным координатам (x, y) [8].

Рассмотрим определение параметров для Новоблагодарненского участка, расположение скважин которого показано на рис. 1

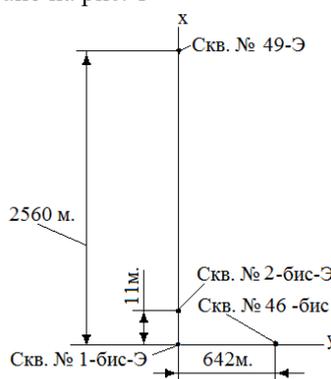


Рис. 1. Расположение скважин рассматриваемого участка

Параметры исследования рассматриваемого продуктивного Сеноман-Маастрихтского водоносного горизонта, полученные в результате ОФР, приведены в табл. 1.

На рис. 2 приведены варианты расчетов параметров звеньев, аппроксимирующих статические характеристики гидролитосферных процессов.

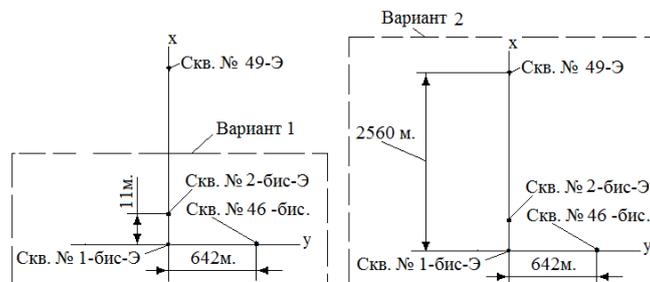


Рис. 2. Варианты расчетов параметров звеньев

Определим коэффициенты гидравлического взаимодействия скважин для первого варианта расчетов.

Приравнивая статические коэффициенты усиления аппроксимирующего звена (полагая $s=0$, радиус депрессионной воронки $r_0=0.2$ м, данный радиус обусловлен конструктивными и геолого-фильтрационными особенностями глубоких эксплуатационных скважин Эссентукского месторождения. В отличие от неглубоких водозаборов, где фильтровая колонна задаёт фиксированный радиус зоны начала линейной фильтрации, глубокие скважины Сенман–Маастрихтского горизонта вскрывают продуктивные породы по открытому стволу (диаметр 165 мм). Фильтровые колонны в их конструкции отсутствуют вследствие высокой крепости карбонатных пород. При длительной и интенсивной эксплуатации происходит вымывание мелких фракций в зонах активного водопритока, что приводит к формированию вокруг ствола расширенной кавернозной зоны. По данным геофизических исследований (кавернометрия), радиус этой «кавернозной» зоны составляет порядка 0,18–0,22 м. В практической гидродинамике для таких условий используется усреднённое значение $r_0=0,2$ м (эффективный радиус зоны) начиная с которой восстанавливается линейная зависимость «дебит–депрессия» и становятся корректными предпосылки классической теории фильтрации. Следует подчеркнуть, что указанное допущение применимо исключительно к совершенным скважинам, полностью вскрывающим пласт от кровли до подошвы, обеспечивающим равномерный приток по всей мощности водоносного горизонта. В таких условиях эффективный радиус r_0 отражает не конструктивные элементы скважины, а фактические геолого-фильтрационные свойства «кавернозной» зоны, сформированной вокруг открытого ствола. Приравнивая статические коэффициенты гидравлического взаимодействия скважин значениям K_1 и K_2 , K_3 (см. табл. 1), и полагая, что $L_1-r_0 \approx L_1$; $L_2-r_0 \approx L_2$, ($L_1=11$ м.; $L_2=642$ м.) получим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), \\ K_2 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \\ K_3 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot K_n \cdot L_2), \beta = (D)^{1/2} \end{array} \right. \quad (3)$$

где D , K и K_n – определяемые параметры [8].

Подставляя в (3) вычисленные значения коэффициентов передачи (см. табл. 1), получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.6923 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 0.2), \\ 0.1846 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 11), \\ 0.1538 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot K_n \cdot 642), \beta = (D)^{1/2} \end{array} \right. \quad (4)$$

Решая полученную систему, приходим к следующему результату:

$$D=0.01498, K=0.086831, K_n=0.019457. \quad (5)$$

Коэффициент статического взаимодействия скважин записывается в виде:

$$W = \frac{0.086831}{\beta} \cdot \exp\left(-\beta \cdot (x^2 + (0.019457 \cdot y)^2)^{0.5}\right) \quad \beta = (0.01498)^{1/2}. \quad (6)$$

По результатам расчетов построены графики, приведенные на рис. 2, 3

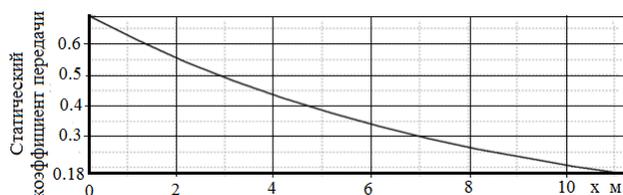


Рис. 3. График изменения статического коэффициента передачи, при изменении $0 \leq x \leq 11$ м

Рассмотрим второй вариант расчетов ($L_1=2560$ м.; $L_2=642$ м.). Подставляя вычисленные значения, получим:

$$\begin{cases} 0.6923 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 0.2), \\ 0.11077 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot 2560), \\ 0.1538 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot K_p \cdot 642), \beta = (D)^{1/2} \end{cases} \quad (7)$$

Решая полученную систему численным методом, придем к следующему результату:

$$D=0.00000053, K= 0.00050329, K_p=3.22401659.$$

Статический коэффициент гидравлического взаимодействия скважин рассматриваемого объекта записывается в виде:

$$W = \frac{0.00050329}{\beta} \cdot \exp\left(-\beta \cdot (x^2 + (3.22401659 \cdot y)^2)^{0.5}\right); \quad (8)$$

$$\beta = (0.00000053)^{1/2}.$$

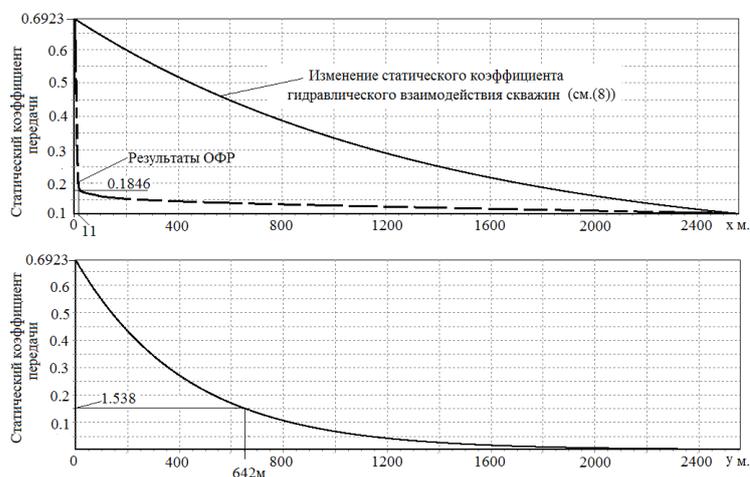


Рис. 4. Графики статических коэффициентов передачи при изменении $0 < x \leq 2560$, $0 < y \leq 2560$

Обсуждение. При описании гидролитосферных процессов в пластах глубокого залегания, методика вычисления параметров аппроксимирующих звеньев (хорошо зарекомендовавшая при исследовании и проектировании систем управления гидрорлитосферными процессами верхних горизонтов (50-400м.)), не может быть использована, при описании гидролитосферных процессов глубокого залегания. На рис. 4 приведены графики

изменения статического коэффициента гидравлического взаимодействия скважин, построенные, с использованием методики, применяемой для верхних горизонтов и с использованием опытно-фильтрационных работ.

При проведении ОФР, вычисление коэффициента передачи по координате x осуществлялось с использованием результатов измерений параметров гидролитосферного процесса в трех скважинах (см. рис. 1).

Для описания гидролитосферных процессов в пластах глубокого залегания, рассмотрим методику **кусочной аппроксимации** статических характеристик гидролитосферных процессов.

Модифицируем методику, приведенную в [11], при этом будем использовать кусочную аппроксимацию статических характеристик на рассматриваемых интервалах ($0 < x \leq 11$, $11 < x \leq 2560$).

Рассматриваемая методика распадается на следующие этапы:

1. Вычисление параметров аппроксимирующего звена для первого интервала ($r_0 \leq x \leq L_2$). Приравняв статические коэффициенты усиления аппроксимирующего звена (полагая, радиус депрессионной воронки $r_0 = 0.2$ м.) значениям K_1 и K_2 , и полагая, что $L_1 = 11$ м. получим систему уравнений:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), \\ K_2 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \end{cases} \quad (9)$$

$$\beta = (D)^{1/2}.$$

Решая которую, определим значения параметров $D_1 = D$ и $K_1 = K$ на первом интервале ($r_0 \leq x \leq L_1$).

Подставляя исходные данные, получим:

$$\begin{cases} 0.6923 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), \\ 0.1846 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \end{cases}$$

$$\beta = (0.12239)^{1/2}, \quad (10)$$

$$K = 1.32182$$

Статический коэффициент передачи аппроксимирующего звена на первом интервале записывается в виде:

$$W_a = \frac{1.32182}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x^2); \quad (11)$$

$$\beta = (0.12239)^{1/2}.$$

2. Вычисление параметров аппроксимирующего звена для второго интервала ($L_1 \leq x \leq L_2$).

$$\begin{cases} K_2 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \\ K_3 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_2), \end{cases} \quad (12)$$

$$\beta = (D)^{1/2}.$$

Подставляя исходные данные и решая полученную систему, определим значения параметров на втором интервале ($L_1 \leq x \leq L_2$).

$$\begin{cases} 0.1856 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \\ 0.1077 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_2), \end{cases}$$

$$\beta = (0.12239)^{1/2}, \quad (13)$$

$$K = 0.00003911$$

Статический коэффициент передачи аппроксимирующего звена на втором интервале записывается в виде:

$$W_a = \frac{0.00003911}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x^2); \quad (14)$$

$$\beta = (0.12239)^{1/2}.$$

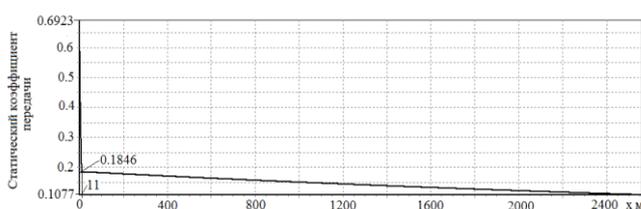


Рис. 5. График статического коэффициента передачи, полученный с использованием методики кусочной аппроксимации

Полученный график статического коэффициента передачи (см. рис. 5), совпадает с графиком, приведенным на рис. 4, построенным с использованием результатов ОФР.

Заключение. Рассматриваемые горизонты глубокого залегания относятся к IV категории сложности месторождений минеральных подземных вод, и как показывают исследования, известные методы описание статических и динамических характеристик, а также изменение уровней минерализации рассматриваемых гидrolитосферных процессов (в виде уравнений в частных производных), а также распределенных аппроксимирующих звеньев [13–15] не применимы для рассматриваемых горизонтов. В результате проведения опытно-фильтрационных работ могут быть определены параметры исследуемых процессов на отдельных участках (изменение уровней, изменение химического состояния добываемого гидроминерального сырья, динамика распространения возмущающих воздействий от добывающих скважин, и др.) [16–20]. Для оценки возможности эксплуатации рассматриваемых месторождений и построения систем управления дебитами добывающих скважин была разработана методика кусочной аппроксимации статических характеристик гидrolитосферных процессов глубокого залегания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондин И.А., Снурницын Г.К. Автоматизация системы управления добычи и мониторинга скважин Ессентукского месторождения минеральных подземных вод // Геология и недропользование. – 2023. – № 3. – С. 159-165.
2. Першин И.М., Помеляйко И.С. Системный анализ экологического состояния зоны гипергенеза курорта Кисловодск // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2013. – № 3 (36). – С. 74-80.
3. Бондин И.А. Системный анализ гидrolитосферных процессов Ессентукского месторождения минеральных подземных вод (Новоблагодарненский участок) // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2025. – № 2. – С. 5-15.
4. Бондин И.А., Снурницын Г.К. Системный анализ процессов в гидrolитосфере Ессентукского месторождения минеральных подземных вод // XII Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика»: Сб. материалов конференции. – 2024. – С. 224-230.
5. Малков А.В., Першин И.М. Синтез распределенных регуляторов для систем управления гидrolитосферными процессами: монография. – М.: Научный мир, 2007. – 252 с.

6. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами: анализ и синтез: монография. – М.: Научный мир, 2012. – 472 с.
7. Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С. Анализ экологического состояния гидроминеральной базы курорта Кисловодск // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2016. – № 1. – С. 12-22.
8. Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С., Уткин В.А., Королев Б.И., Дубогрей В.Ф., Хмель В.В., Першин М.И. Кисловодское месторождение углекислых минеральных вод: системный анализ, диагностика, прогноз, управление: монография. – М.: Наука, 2015. – 283 с.
9. Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 126-138.
10. Першин И.М., Веселов Г.Е., Першин М.И. Методы аппроксимации передаточных функций распределенных объектов // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. научных трудов VII Всероссийской научной конференции. – 2015. – С. 106-117.
11. Першин И.М., Носова В.А., Русак С.Н. Определение параметров распределенных звеньев, аппроксимирующих гидролитосферные процессы // Современная наука и инновации. Научный журнал. – 2021. – Вып. № 2 (34). – С. 10-16.
12. Першин И.М., Малков А.В., Криштал В.А. Построение системы управления параметрами эксплуатации системы добычи минеральной воды в регионе КМВ // Современная наука и инновации. – 2013. – № 1 (1). – С. 17-23.
13. Kukharova T.V., Pershin I.M., Utkin V.A. Modeling of a decision support system for a psychiatrist based on the dynamics of electrical conductivity parameters // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. – 2021. – P. 975-978.
14. Makarova A.A., Kaliberda I.V., Pershin I.M., Kovalev D.A. Modeling a production well flow control system using the example of the verkhneberezovskaya area // Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022. – 2022. – P. 760-764.
15. Pershin I.M., Papush E.G., Malkov A.V., Kukharova T.V., Spivak A.O. Operational control of underground water exploitation regimes // Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019. – 2019. – P. 77-80.
16. Pershin I.M., Pervukhin D.A., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – 87. – 032029. – P 1-7. – doi: 10.1088/1755-1315/87/3/032029 (skop).
17. Kukharova T.V., Pershin I.M., Malkov A.V. The Study of Periodic Effects on Parameters of Hydrolytospheric Processes // 2019 International Science and Technology Conference “EastConf”. – 2019. – P. 7.
18. Першин И.М., Кузьмин Н.Н., Малков А.В. Формирование целевых функций в задачах управления гидролитосферными процессами // 5-я Российская мультиконференция по проблемам управления: Сб. материалов конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2012). – 2012. – С. 622-632.
19. Drovosekova T.I., Pershin I.M. Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of kavkazskiye mineralnye vody (caucasus mineral springs) // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. – 2016. – P. 215-217.
20. Asadulagi M.A.M., Pershin I.M., Tsapleva V.V. Research on Hydrolithospheric processes using the results of groundwater inflow testing // Water. – 2024. – Vol. 16, No. 3. – P. 487.

REFERENCES

1. Bondin I.A., Snurnitsyn G.K. Avtomatizatsiya sistemy upravleniya dobychi i monitoringa skvazhin Essentukskogo mestorozhdeniya mineral'nykh podzemnykh vod [Automation of the control system for extraction and monitoring of wells at the Essentuki mineral groundwater field], *Geologiya i nedropol'zovanie* [Geology and Subsoil Use], 2023, No. 3, pp. 159-165.
2. Pershin I.M., Pomelyayko I.S. Sistemnyy analiz ekologicheskogo sostoyaniya zony gipergeneza kurorta Kislovodsk [System analysis of the ecological state of the hypergenesis zone of the Kislovodsk resort], *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of the North-Caucasus Federal University], 2013, No. 3 (36), pp. 74-80.
3. Bondin I.A. Sistemnyy analiz gidrolitosfernykh protsessov Essentukskogo mestorozhdeniya mineral'nykh podzemnykh vod (Novoblagodarnenskiy uchastok) [System analysis of hydrolithospheric processes of the Essentuki mineral groundwater field (Novoblagodarnensky area)], *Vestnik Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna* [Bulletin of Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design], 2025, No. 2, pp. 5-15.
4. Bondin I.A., Snurnitsyn G.K. Sistemnyy analiz protsessov v gidrolitosfere Essentukskogo mestorozhdeniya mineral'nykh podzemnykh vod [System analysis of hydrolithospheric processes of the Essentuki mineral groundwater field], *XII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika»: Sb. materialov konferentsii* [XII All-Russian Scientific Conference “System Synthesis and Applied Synergetics”: Conference Proceeding], 2024, pp. 224-230.

5. *Malkov A.V., Pershin I.M.* Sintez raspredelennykh regulyatorov dlya sistem upravleniya gidrolitosfernymi protsessami: monografiya [Synthesis of distributed controllers for hydrolithospheric process control systems: monograph]. Moscow: Nauchnyy mir, 2007, 252 p.
6. *Malkov A.V., Pershin I.M.* Sistemy s raspredelennymi parametrami analiz i sintez: monografiya [Distributed parameter systems: analysis and synthesis: monograph]. Moscow: Nauchnyy mir, 2012, 472 p.
7. *Malkov A.V., Pershin I.M., Pomelyayko I.S.* Analiz ekologicheskogo sostoyaniya gidromineral'noy bazy kurorta Kislovodsk [Analysis of the ecological state of the hydromineral resource base of the Kislovodsk resort], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration], 2016, No. 1, pp. 12-22.
8. *Malkov A.V., Pershin I.M., Pomelyayko I.S., Utkin V.A., Korolev B.I., Dubogrey V.F., Khmel' V.V., Pershin M.I.* Kislovodskoe mestorozhdenie uglekislykh mineral'nykh vod: sistemnyy analiz, diagnostika, prognoz, upravlenie: monografiya [Kislovodsk carbonated mineral water field: system analysis, diagnostics, forecasting, and control: monograph]. Moscow: Nauka, 2015, 283 p.
9. *Pershin I.M., Veselov G.E., Pershin M.I.* Approksimatsionnye modeli peredatochnykh funktsiy raspredelennykh ob'ektov [Approximation models of transfer functions of distributed objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 126-138.
10. *Pershin I.M., Veselov G.E., Pershin M.I.* Metody approksimatsii peredatochnykh funktsiy raspredelennykh ob'ektov [Methods for approximating transfer functions of distributed objects. in: system synthesis and applied synergetics], *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. nauchnykh trudov VII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [System Synthesis and Applied Synergetics: Proceedings of the VII All-Russian Scientific Conference], 2015, pp. 106-117.
11. *Pershin I.M., Nosova V.A., Rusak S.N.* Opredelenie parametrov raspredelennykh zven'ev, approksimiruyushchikh gidrolitosfernye protsessy [Determination of parameters of distributed elements approximating hydrolithospheric processes], *Sovremennaya nauka i innovatsii. Nauchnyy zhurnal* [Modern Science and Innovations], 2021, Issue No. 2 (34), pp. 10-16.
12. *Pershin I.M., Malkov A.V., Krishtal V.A.* Postroenie sistemy upravleniya parametrami ekspluatatsii sistemy dobychi mineral'noy vody v regione KMV [Development of a control system for operational parameters of mineral water extraction in the Caucasian Mineral Waters region], *Sovremennaya nauka i innovatsii* [Modern Science and Innovations], 2013, No. 1 (1), pp. 17-23.
13. *Kukharova T.V., Pershin I.M., Utkin V.A.* Modeling of a decision support system for a psychiatrist based on the dynamics of electrical conductivity parameters, *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021*, 2021, pp. 975-978.
14. *Makarova A.A., Kaliberda I.V., Pershin I.M., Kovalev D.A.* Modeling a production well flow control system using the example of the verkhneberezhovskaya area, *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022*, 2022, pp. 760-764.
15. *Pershin I.M., Papush E.G., Malkov A.V., Kukharova T.V., Spivak A.O.* Operational control of underground water exploitation regimes, *Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019*, 2019, pp. 77-80.
16. *Pershin I.M., Pervukhin D.A., Iyushin Y.V., Afanaseva O.V.* Design of distributed systems of hydrolithosphere processes management. A synthesis of distributed management systems, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 87, 032029, pp 1-7. doi: 10.1088/1755-1315/87/3/032029 (skop).
17. *Kukharova T.V., Pershin I.M., Malkov A.V.* The Study of Periodic Effects on Parameters of Hydrolithospheric Processes, *2019 International Science and Technology Conference "EastConf"*, 2019, pp. 7.
18. *Pershin I.M., Kuz'min N.N., Malkov A.V.* Formirovanie tselevykh funktsiy v zadachakh upravleniya gidrolitosfernymi protsessami [Formation of objective functions in hydrolithospheric process control problems], *5-ya Rossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya: Sb. materialov konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v upravlenii» (ITU-2012)* [Proceedings of the 5th Russian Multiconference on Control Problems "Information Technologies in Control" (ITU-2012)], 2012, pp. 622-632.
19. *Drovosekova T.I., Pershin I.M.* Peculiarities of modelling hydro-lithospheric processes in the region of kavkazskiye mineralnye vody (caucasus mineral springs), *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016*, 2016, pp. 215-217.
20. *Asadulagi M.A.M., Pershin I.M., Tsapleva V.V.* Research on Hydrolithospheric processes using the results of groundwater inflow testing, *Water*, 2024, Vol. 16, No. 3, pp. 487.

Бондин Иван Андреевич – ООО "Холдинг Аква"; e-mail: bondin@sfedu.ru; г. Ессентуки, Россия; тел.: 89283385622; зам. директора Департамента недропользования; аспирант ЮФУ.

Bondin Ivan Andreevich – Subsoil Use Department of Holding Aqua LLC; e-mail: bondin@sfedu.ru; Essentuki, Russia; phone: +79283385622; deputy director; postgraduate student of SFU.

А.А. Дорофеев

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СПЛАЙНОВЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Математическое моделирование широко применяется в различных сферах деятельности, однако в случаях, когда имеющейся численной информации недостаточно для получения полного представления об объекте, построение математической модели затруднено или может привести к заведомо недостоверному результату. Существуют подходы к решению задач моделирования в условиях недостатка данных, при этом для получения необходимого результата может возникнуть необходимость использования методов, имеющих сложную математическую структуру. В связи с этим актуальной является задача адаптации математических методов к условиям недостатка данных. В данной работе рассмотрено решение задачи интерполяции с использованием сплайн-функций – одного из наиболее широко используемых методов как в математической теории, так и в прикладной математике. Разработана методика, позволяющая адаптировать сплайновые методы к условиям недостатка исходных числовых данных; применение этой методики к построению модели образующей цилиндра с эллиптическими днищами обеспечило гладкую стыковку фрагментов и отсутствие перегибов. Выполнение требований точности и гладкости модели было достигнуто за счёт последовательного уточнения числовых данных посредством введения в модель дополнительных узлов интерполяции и корректировки их расположения. В результате построения и анализа модели установлено, что сплайновые методы могут быть применены к решению задач интерполяции практически любой сложности. При этом наличие аналитического обоснования каждого шага процесса моделирования позволяет полностью автоматизировать вычисления. Рассматриваемая в статье задача связана с изготовлением изделий на станках с числовым программным управлением. Однако в силу своей универсальности данная методика может быть применена на практике к решению задач в различных отраслях деятельности. Практическая ценность разработанной методики состоит в возможности её применения ко многим задачам, имеющим прикладную направленность, а её включение в состав современных систем проектирования и пакетов прикладных программ позволит расширить их функциональность за счёт предоставления пользователю возможности введения дополнительных ограничений, накладываемых на модель исходя из практической точки зрения, что может обеспечить высокую степень гибкости реализации.

Математическое моделирование; сплайн-функции; интерполяция; поверхность вращения; кубический сплайн; линейно-экспоненциальный сплайн; численный анализ модели.

A.A. Dorofeev

THE TECHNIQUE FOR SPLINE APPROXIMATIONS BUILDING IN CONDITIONS OF LIMITED SOURCE DATA

Mathematical modeling is widely applied in different fields of activity but in cases when the available numerical information is insufficient to get a complete picture of the object mathematical model building is difficult or can lead to a deliberately unreliable result. There are approaches to solving modeling problems with a lack of data therewith it may be necessary to use methods with complicated mathematical structure to get the desired result. In this regard, the task of adapting mathematical methods to data scarcity conditions is relevant. This paper discusses the solution of the interpolation problem using spline functions as one of the most widely used methods in mathematical theory and applied mechanics. A technique has been developed to adapt spline methods to data shortage conditions, applying this technique to building of a cylinder with elliptical bottoms forming model provided smooth joining of fragments and absence of kinks. Meeting the requirements of precision and smoothness of the model was achieved by sequential refinement of numerical data with adding interpolation nodes to the model and correction of their location. As a result of building and analysis of the model it was found that spline methods can be applied to solving interpolation problems of almost any complexity. The availability of an analytical justification for every step of modeling process allows to automate the process fully. The problem considered in the article is connected with manufacturing products on the numerically controlled machines. However, this technique due to its versatility can be applied to solving problems in various fields of activity. The practical value of the developed technique is the possibility of its application to many practical tasks.

Its integration into modern CAD systems and application software packages will allow to expand their functionality by providing the user with the possibility to introduce the extra restrictions imposed on the model practically what can ensure a high degree of implementation flexibility.

Mathematical modeling; spline functions; interpolation; surface of revolution; cubic spline; linear-exponential spline; numerical analysis of a model.

Введение. В современных условиях математическое моделирование широко применяется и развивается, охватывая различные сферы деятельности. Во многом это обусловлено использованием пакетов прикладных программ моделирования, которые предоставляют пользователю средство обработки информации, обладающее обширными возможностями выбора методов и средств моделирования и при этом не требующее знаний языков программирования. Процесс моделирования организуется в форме диалога между человеком и персональным компьютером.

Одной из основных сложностей, возникающих на практике при построении математических моделей, является недостаток исходной информации о моделируемом объекте, что может существенно затруднять построение модели, адекватно описывающей основные свойства объекта, а также привести к неправильным выводам и ошибкам в анализе. Причины недостатка исходных данных, могут заключаться как в сложности сбора данных, так и в специфике свойств моделируемого объекта, заключающейся в том, что для получения полного представления об объекте необходимо владеть некоторой дополнительной информацией помимо той, что может быть выражена количественно.

В [1] сформулирована постановка задачи моделирования в условиях недостатка данных, а также предложен подход к её решению с использованием сплайн-интерполяции: образующая поверхности вращения определяется как кусочно-заданная функция

$$f(x) = \begin{cases} \sqrt{1-4x^2}, & x \in [-0.45, 0); \\ 1, & x \in [0, 5]; \\ \sqrt{1-16(x-5)^2}, & x \in (5, 5.12], \end{cases} \quad (1)$$

при этом осложняющим фактором для построения сплайновой модели является разнородность фрагментов, её составляющих – прямолинейный участок, составляющий около 90% ширины образующей, с обеих сторон дополняется двумя дугами эллипса. Как отмечено в [2], приближения данной функции с помощью полиномиальных сплайнов сильно отклоняются от прямой линии на этом продолжительном участке. При этом также следует принять во внимание, что уточнение исходных данных путём добавления дополнительных узлов сети данных вдоль прямой не приведёт к качественному улучшению модели, так как полученное в результате приближение будет содержать локальные минимумы и максимумы на отрезках между этими узлами, что в данном случае неприемлемо с практической точки зрения – изготавливаемое по модели изделие вследствие дефекта формы не может быть пригодным к использованию.

Таблица 1

Исходные данные – координаты узлов интерполяции

x_i	-0.450	-0.225	0.000	5.000	5.120	5.240
y_i	0.436	0.893	1.000	1.000	0.877	0.280

Таким образом, исходная численная информация о модели (данные приведены в табл. 1) требует уточнения в виде дополнительных ограничений, обусловленных практически. Эти ограничения сформулированы в [1] и заключаются в следующем: 1) допустимое отклонение не превышает заданного значения ε ; 2) первая производная не должна осциллировать (т.е. переходить через нуль более одного раза); 3) вторая производная должна быть непрерывной и не принимать положительных значений. В [2] рассмотрено решение этой задачи с помощью линейно-экспоненциального сплайна – параметрической конструкции, при этом решение сводится к подбору значения параметра, что не является тривиальной задачей, так как требует анализа свойств базисных функций сплайнов, и соответственно функция, приближающая прямолинейный участок, имеет вид

$$T(x)|_{[0,5]} = 1.000184 + 0.0000441031x + 2.868004 \cdot 10^{-218} \sinh(-493 + 98.6x) - 6.313798 \cdot 10^{-218} \sinh(98.6x). \quad (2)$$

Так как для вычисления третьего и четвёртого слагаемых по формуле (2) требуется перемножение большого ($\sinh 493 \approx \frac{e^{493}}{2}$ порядка 10^{213}) и малого (порядка 10^{-218}) чисел, то в условиях ограниченности разрядной сетки возможны значительные отклонения расчётных моделей от ожидаемого результата, по величине превышающие требуемую точность на несколько порядков вследствие ошибок округления.

Материалы и методы. В данной работе рассмотрено решение этой задачи с помощью кубического сплайна, включая процесс уточнения исходных данных, а также анализ полученных результатов. Кубическая сплайн-интерполяция – это метод интерполяции, при котором для заданного набора точек (узлов) строится кусочно-заданная функция, состоящая из кубических полиномов. Этот метод обеспечивает высокую степень гладкости, так как первые и вторые производные полинома непрерывны в узловых точках, а также отличается простотой реализации.

Сплайн-функции являются одним из самых популярных методов интерполяции благодаря их эффективности и точности и находят широкое применение в построении математических моделей с помощью современного специализированного программного обеспечения. Благодаря своей распространённости сплайновые методы могут быть адаптированы к различным условиям посредством создания соответствующей модификации. Так, возможно применение систем базисных сплайнов для аппроксимации функций и экспериментальных зависимостей, имеются алгоритмы для определения параметров сплайнов [3]; разрабатываются алгоритмы, связанные с приближением сплайн-функциями, даётся описание пространств сплайнов, описываются алгоритмы приближения интерполяционными кубическими сплайнами с учётом граничных условий, а также параболические сплайны, В-сплайны и адаптивная аппроксимация сплайнами [4]. Для оптимизации параметров сплайна может быть использована математическая модель в виде модифицированной функции Лагранжа и специальный алгоритм нелинейного программирования [5]; с помощью сплайн-функций выполняется интерполяция сложных кривых поверхностей, для чего предлагается универсальная методика проектирования поверхностей сложных форм с использованием обобщённых эрмитовых сплайнов [6]. Помимо этого, решаются задачи выбора функционального базиса сплайна путём эффективного размещения узлов [7] и с помощью модификации кубического сплайна с изменением положения узлов склеивания [8], выполняется сравнительный анализ результатов приближённого вычисления с точными данными при интерполяции кубическим сплайном, включая анализ погрешностей и расхождений [9].

Многие практические задачи интерполяции решаются с помощью сплайнов: в [10] рассматривается двухэтапная схема при неизвестном числе элементов сплайна для аппроксимации многозначных функций, заданных последовательностью точек на плоскости, на примере задачи проектирования плана трасс линейных сооружений; в [11] для решения этой задачи используются сплайны сложной структуры. В [12] рассматриваются методы построения гладких решений в виде рациональных сплайн-функций специального вида для начальной задачи в случае нормальной системы двух дифференциальных уравнений.

Также заслуживают внимание современные исследования, связанные с применением сплайновых методов. Так, популярными являются В-сплайновые методы; имеются разработки на их основе, примерами которых могут служить модель подавления шума на усечённом телевизионном изображении с помощью дробного В-сплайна [13], а также моделирование суточных колебаний температуры с помощью В-сплайновой регрессии и усечённой сплайновой модели [14]. Широкое применение находят сплайновые конструкции специального вида; к таковым могут быть отнесены тонкопластинные сплайны (TPS), применяемые для анализа биомедицинских изображений [15] и в аналитических исследованиях – на основе методов TPS может строиться аппроксимация Лапласа, применяемая для максимизации предельной вероятности при анализе модели тонких пластин с косой нормалью

[16]. Аналитические исследования, основанные на сплайновых методах, также включают в себя разработку типизированных сплайновых методов для решения дифференциальных уравнений специального вида [17] и другие их применения и адаптации.

Для построения модели, удовлетворяющей указанным выше условиям, требуется уточнение данных на участке, где наблюдается максимальное отклонение от функции-оригинала, что может быть достигнуто посредством добавления дополнительных узлов склеивания на интервале $(0, 5)$ (исходные данные приведены в табл. 1). Необходимо обратить внимание, что во избежание образования локальных экстремумов новые узлы следует располагать не строго вдоль прямой линии, при этом величина отступа не должна превышать допустимое отклонение $\varepsilon = 0.02$. Также следует учитывать, что введение дополнительных данных увеличивает вычислительную нагрузку на модель, в связи с чем уточнение должно выполняться исходя из соображений рациональности, то есть вклад каждого добавляемого узла в улучшение качественных свойств модели должен быть максимально возможным. Выполним с этой целью описанные ниже действия.

Для выявления точки максимального отклонения исследуем первую производную функции $S_0(x)$ – естественного кубического сплайна, построенного по исходным числовым данным и граничным условиям $S_0''(x) = 0$. На рис. 1 приведено графическое представление функции $S_0(x)$ в сопоставлении с моделируемой функцией $f(x)$, определяемой формулой (1), и производных первого и второго порядка вблизи точек стыка. Из этого сопоставления видно, что максимальное отклонение δ_{\max} достигается именно на интервале $(0, 5)$, где наблюдается недостаток данных (рис. 1,а), а вторая производная функции $f(x)$ имеет разрывы в точках стыка эллиптического и прямолинейного участков, в то время как сплайновая модель обеспечивает гладкость первой производной и соответственно непрерывность второй производной на всём интервале задания функции (рис. 1,б,в). На интервале $(0, 5)$ функция $S_0(x)$ определяется многочленом третьей степени:

$$S_0(x)|_{[0, 5]} = 1 + 0.0829031x - 0.0262926x^2 + 0.00194240x^3.$$

Так как максимальное отклонение наблюдается в точке экстремума, то в результате получаем, что $\delta_{\max} \approx 0.076$ при $x^* \approx 2.036$ – это значение является решением уравнения

$$0.0829031 - 0.0525853x + 0.00582721x^2 = 0,$$

левая часть которого определяет первую производную $S_0'(x)$ на интервале $(0, 5)$. Добавляя новый узел склеивания (x^*, y^*) , необходимо учитывать величину допустимого отклонения от исходных значений, поэтому в качестве y^* выберем максимально возможное значение, которое может быть скорректировано в соответствии с требованиями, накладываемыми условиями задачи. В нашем случае можно положить $y^* = 1.019$, что будет являться значением моделирующей функции при $x = x^*$; таким образом, для построения следующего приближения $S_1(x)$ числовые данные дополняются узлом $(x^*, y^*) = (2.036, 1.019)$, который будет участвовать в дальнейших построениях наряду с имеющимися узлами. Все шаги уточнения данных, а также результаты анализа полученных моделей отражены в итоговых табл. 4 и 5, приведённых в конце раздела.

По числовым данным, представленным в третьей строке табл. 4, строится модель $S_1(x)$ – кубический сплайн с граничными условиями $S_1''(x) = 0$:

$$S_1(x)|_{[0, 5]} = \begin{cases} 1 + 0.0787930x - 0.0576072x^2 + 0.0115377x^3, & x \in [0, 2.036]; \\ 1.128350 - 0.110328x + 0.0352811x^2 - 0.00366991x^3, & x \in (2.036, 5]. \end{cases}$$

На рис. 2 и в табл. 5 (первая и вторая строки) приведены результаты сопоставления моделей S_1 и S_0 : так, для модели S_1 по сравнению с моделью S_0 улучшение свойств модели наблюдается только по величине максимального отклонения, хотя оно также

превышает допустимое (рис. 2,а), при этом первая производная S_1' обращается в нуль в трёх точках (рис. 2,б), а вторая производная S_1'' принимает положительные значения на интервале большей длины (рис. 2,в). Отсюда следует, что дальнейшую корректировку данных следует выполнять также исходя из соображений выполнения условия на величину максимально допустимого отклонения δ_{\max} .

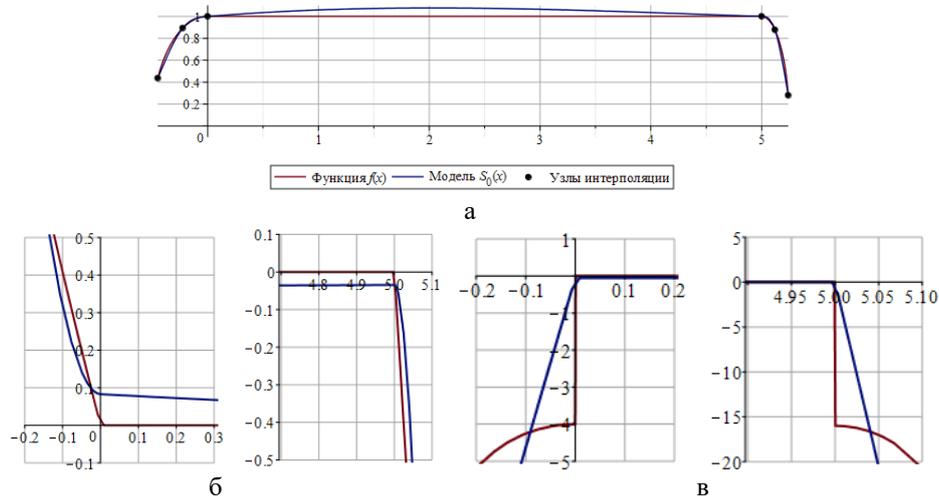


Рис. 1. Сопоставление моделируемой функции – образующей поверхности вращения $f(x)$ и кубической сплайновой модели $S_0(x)$, построенной по 6 точкам исходных данных: а – графики функций (соотношение горизонтального и вертикального масштабов 1:1), б – первая производная, в – вторая производная

Для модели S_1 точка максимального отклонения определяется исходя из соотношения $S_1'(x) = 0$:

$$0.0787930 - 0.115214x + 0.0346132x^2 = 0$$

(левая часть этого уравнения определяет первую производную сплайна S_1 на интервале $(0, 2.036)$, где наблюдается максимальное отклонение), откуда $x \approx 0.962$.

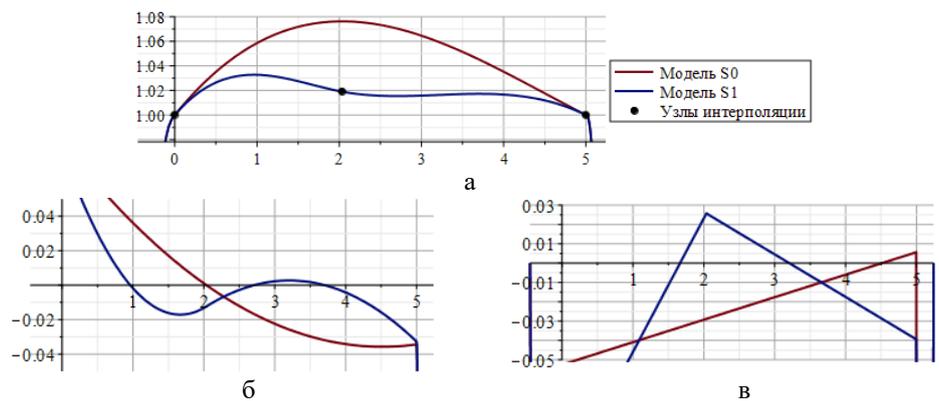


Рис. 2. Сопоставление кубических сплайновых моделей S_0 – исходная модель (по 6 узлам) и S_1 – модель после добавления одного дополнительного узла: а – отклонение от прямой линии на интервале $[0, 5]$, б – первая производная; в – вторая производная; на графиках видны участки, где требуется корректировка данных

При добавлении новых данных в модель кубической сплайн-интерполяции важным этапом является определение координат узлов с учётом изменения поведения интерполяционной функции. Для повышения точности модели вместо фиксированного выбора значений моделирующей функции $y^* = f(x^*)$ в добавляемых узлах склеивания целесообразно рассмотреть параметрическое представление значения y^* в виде $y^* = 1 + z$, где приращение z варьируется от 0 до z_{\max} – максимального значения, определяемого исходя из координат ближайших узлов склеивания. Так, для модели S_1 значение z при добавлении узла склеивания в точке $x^* = 0.962$ может изменяться в пределах от 0 до 0.019.

Зависимость величины максимального отклонения и количества точек обращения в нуль первой производной, а также расположения этих точек от величины z достаточно сложна и требует содержательного аналитического исследования. Здесь мы рассмотрим экспериментальное исследование – сопоставим несколько моделей, построенных для различных значений z в указанных выше границах при $x^* = 0.962$; в табл. 2 и на рис. 3,а приведены результаты этого сопоставления. Таким образом, для модели S_2 в качестве оптимального может быть принято значение z^* , соответствующее минимуму максимального отклонения:

$$\delta_{\max}(z^*) = \min_z \delta_{\max}(z) \Rightarrow z^* = 0.018;$$

числовые данные для построения модели S_2 приведены в строке 4 табл. 4.

Таблица 2

Зависимость максимального отклонения моделирующей функции от величины приращения z при добавлении узла склеивания в точке $x^* = 0.962$

z	0.001	0.005	0.010	0.015	0.018
δ_{\max}	0.032	0.030	0.028	0.025	0.024

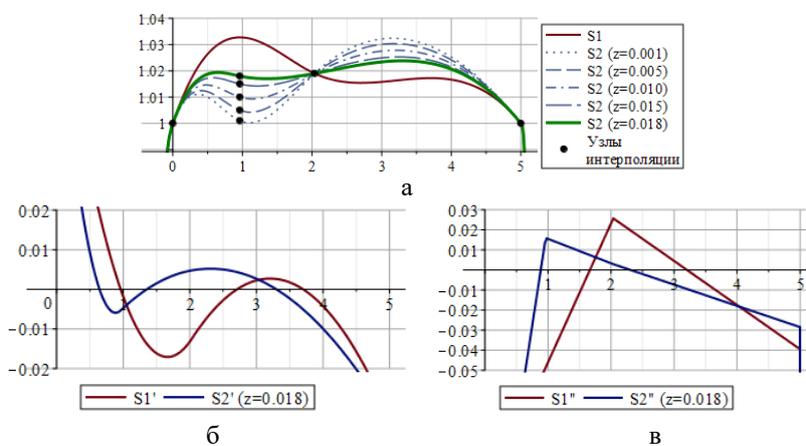


Рис. 3. Сопоставление графиков моделей S_1 и S_2 : а – определение оптимального расположения дополнительного узла для построения модели S_2 , б – первая производная; в – вторая производная

Анализируя полученную модель S_2 :

$$S_2(x)|_{[0,5]} = \begin{cases} 1 + 0.0744273x - 0.0908700x^2 + 0.0342546x^3, & x \in [0, 0.962]; \\ 1.032305 - 0.0263169x + 0.0138537x^2 - 0.00203225x^3, & x \in (0.962, 2.036]; \\ 1.030047 - 0.0229894x + 0.0122194x^2 - 0.00176468x^3, & x \in (2.036, 5], \end{cases}$$

заключаем, что ни одно из требований, накладываемых условиями задачи, для этой модели также не выполняется: максимальное отклонение также превышает допустимое, а первая производная обращается в нуль в трёх точках (результаты численного анализа приведены в третьей строке табл. 5). При этом качественные улучшения заключаются в уменьшении абсолютной величины максимального отклонения, уменьшении амплитуды осцилляций первой производной (рис. 3,б), а также уменьшении абсолютной величины положительного максимума второй производной (рис. 3,в). Таким образом, дальнейшее уточнение модели также следует выполнять посредством добавления узлов склеивания в точках с наибольшим отклонением, при этом индикатором местоположения этих точек является выполнение равенства $S'(x) = 0$.

Повторяя эти операции несколько раз, получим модель S_3 :

$$S_3(x)|_{[0, 5]} = \begin{cases} 1 + 0.0723236x - 0.106898x^2 + 0.0552429x^3, & x \in [0, 0.645]; \\ 1.015402 + 0.000688545x + 0.00416376x^2 - 0.00215353x^3, & x \in (0.645, 0.962]; \\ 1.013165 + 0.00766276x - 0.00308594x^2 + 0.000358495x^3, & x \in (0.962, 2.036]; \\ 1.012033 + 0.00933032x - 0.00390498x^2 + 0.000492587x^3, & x \in (2.036, 3.301]; \\ 1.178036 - 0.141536x + 0.0417982x^2 - 0.00412250x^3, & x \in (3.301, 5] \end{cases}$$

(рис. 4 и четвёртая строка табл. 5), для которой условия на величину максимального отклонения и однократное обращение в нуль первой производной выполняются (рис. 4,а,б), а по свойствам второй производной имеются качественные улучшения: производная S_3'' принимает положительные значения на отрезке меньшей длины по сравнению с производной S_2'' , также положительный максимум производной S_3'' имеет меньшую абсолютную величину (рис. 4,в). При этом необходимо отметить, что выявление качественных улучшений свойств моделирующей функции и производных является существенным и в случае невыполнения ограничений, накладываемых условиями задачи, так как величина фактического отклонения от допустимого оказывает влияние на форму и гладкость модели. Также при анализе важно обращать внимание на «потенциально проблемные» участки, в которых могут нарушаться условия при дальнейшем уточнении положения узлов; так, для модели S_3 таковой является окрестность точки $x^* = 0.645$, где вторая производная имеет локальный максимум (рис. 4,в). Что касается дальнейшего уточнения числовых данных, то для модели S_3 требуется коррекция значения функции в точке $x^* = 3.301$, соответствующей положительному максимуму второй производной: нарушение условия $S_3''(x) \leq 0$ свидетельствует о наличии перегиба в окрестности данной точки.

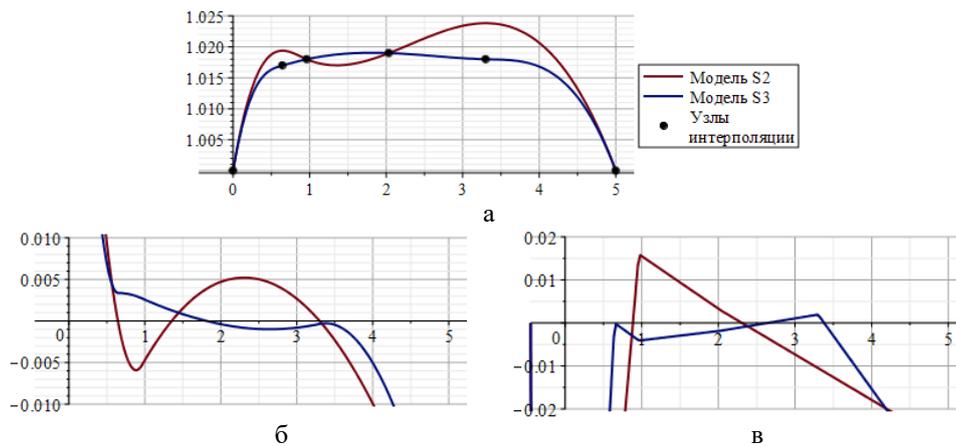


Рис. 4. Сопоставление моделей S_2 и S_3 : а – отклонение от прямой, б – первая производная; в – вторая производная

Для устранения перегиба необходимо скорректировать положение узла с помощью сдвига вверх, что соответствует увеличению значения y^* . Таким образом, значение z для данной точки может изменяться в пределах от 0.018 (текущее значение) до 0.019, что согласуется со значением в соседнем узле. Вторая производная кубического сплайна является кусочно-линейной функцией от x , для анализа представляет интерес её зависимость от величины параметра z на отрезках, прилегающих к корректируемому узлу склеивания:

$$\tilde{S}_{4,z}''(x)|_{[2.036, 5]} = \begin{cases} (0.0629053 - 3.330546z)x - 0.162718 + 8.606005z, & x \in [2.036, 3.301]; \\ (-0.0723199 + 2.643606z)x + 0.283660 - 11.114670z, & x \in (3.301, 5], \end{cases} \quad (3)$$

где $\tilde{S}_{4,z}''(x)$ – вторая производная функции, получаемой при построении сплайна по данным для S_3 с использованием параметрического представления $y^* = 1 + z$ при $x^* = 3.301$, т.е. «предполагаемая» вторая производная функции S_4 . При подстановке $x = 3.301$ в (3) имеем:

$$\tilde{S}_{4,z}''(3.301) = 0.0449325 - 2.388128z;$$

как следует из рис. 5,а, коррекция положения узла склеивания при $x^* = 3.301$ может привести к нарушению условия неположительности второй производной в другой точке $x^* = 2.036$, поэтому необходимо рассмотреть также аналитическое представление второй производной и для этого значения:

$$\tilde{S}_{4,z}''(2.036) = -0.0346428 + 1.825013z.$$

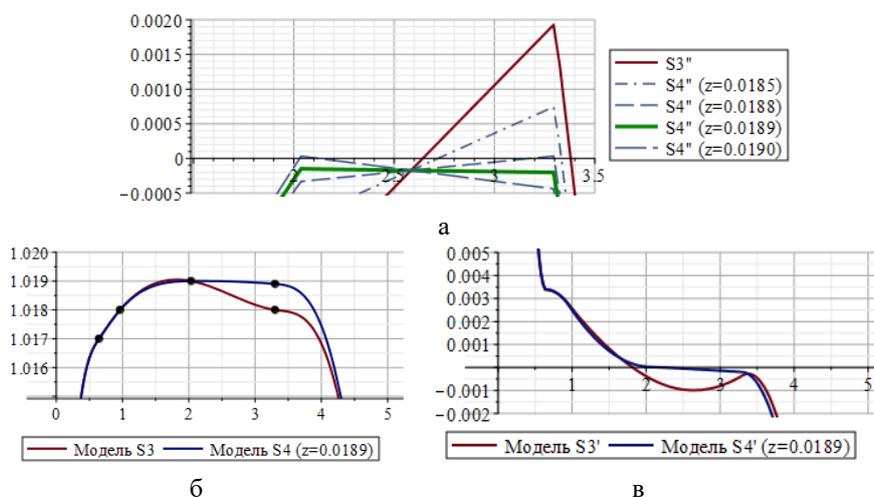


Рис. 5. Сопоставление моделей S_3 и S_4 : а – уточнение положения узла на основе коррекции по второй производной, б – моделирующая функция (устранение перегиба), в – первая производная

Для соблюдения условия неположительности требуется выполнение двух неравенств: $\tilde{S}_{4,z}''(3.301) \leq 0$, $\tilde{S}_{4,z}''(2.036) \leq 0$. Решая эту систему относительно z , получаем

$$0.0188149 \leq z \leq 0.0189822;$$

таким образом, в качестве оптимального с точностью до 0.0001 может быть принято значение $z^* = 0.0189$.

С учётом выполненной коррекции числовые данные для построения модели S_4 приведены в шестой строке табл. 4. При построении получаем, что

$$S_4(x)|_{[0, 5]} = \begin{cases} 1 + 0.0723205x - 0.106922x^2 + 0.0552867x^3, & x \in [0, 0.645]; \\ 1.015522 + 0.000125186x + 0.00500895x^2 - 0.00255866x^3, & x \in (0.645, 0.962]; \\ 1.012608 + 0.00921106x - 0.00443582x^2 + 0.000713952x^3, & x \in (0.962, 2.036]; \\ 1.018693 + 0.000245438x - 0.0000322759x^2 - 6.995107 \cdot 10^{-6}x^3, & x \in (2.036, 3.301]; \\ 1.152463 - 0.121327x + 0.0367966x^2 - 0.00372595x^3, & x \in (3.301, 5]; \end{cases}$$

графическое представление модели приведено на рис. 5,б,в), результаты численного анализа – в пятой строке табл. 5. Таким образом, требование $S_4''(x) \leq 0$ также остаётся невыполненным, в данном случае положительное значение максимума второй производной обусловлено образованием перегиба в окрестности точки $x^* = 0.645$; при этом качественные улучшения заключаются в уменьшении величины максимума и сокращении длины отрезка положительности второй производной S_4'' , а дальнейшую корректировку модели необходимо выполнять, изменяя вертикальное положение узла склеивания при $x^* = 0.645$.

При построении модели S_5 также рассмотрим аналитическое представление второй производной, отражающее её зависимость от величины параметра z , определяющего положение узла склеивания при $x^* = 0.645$, на прилежащих отрезках:

$$\tilde{S}_{5,z}''(x)|_{[0, 0.962]} = \begin{cases} (1.238376 - 53.332733z)x - 0.443723 + 13.522308z, & x \in [0, 0.645]; \\ (-1.679061 + 97.865237z)x + 1.438024 - 84.000382z, & x \in [0.645, 0.962]. \end{cases} \quad (4)$$

Сравнивая представления (3) и (4), заключаем, что выражения для производной S_5'' содержит большие по модулю коэффициенты при z , что говорит о более высокой чувствительности этой модели к изменению положения узла склеивания. Так как максимум производной S_5'' наблюдается при $x^* = 3.301$, то для более полного анализа целесообразно привести также аналитическое представление производной на отрезках интерполяции, прилегающих к этому узлу:

$$\tilde{S}_{5,z}''(x)|_{[2.036, 5]} = \begin{cases} (-0.0418574 + 2.459830z)x + 0.127501 - 7.503870z, & x \in [2.036, 3.301]; \\ (-0.0132941 - 0.533036z)x + 0.0332139 + 2.375250z, & x \in [3.301, 5], \end{cases}$$

откуда $\tilde{S}_{5,z}''(0.645) = 0.355030 - 20.877304z$, $\tilde{S}_{5,z}''(3.301) = -0.0106700 + 0.615698z$.

Решая систему неравенств $\tilde{S}_{5,z}''(0.645) \leq 0$, $\tilde{S}_{5,z}''(3.301) \leq 0$ относительно z , получаем

$$0.0170055 \leq z \leq 0.0173299,$$

откуда следует, что с точностью до 0.0001 в качестве оптимального значения z^* может быть принято одно из значений 0.0171, 0.0172, 0.0173. Для однозначного определения оптимального значения z^* рассмотрим аналитическое представление второй производной на отрезках, прилегающих к узлу $x^* = 0.645$:

$$\tilde{S}_{5,0.0171}''(x)|_{[0, 0.962]} = \begin{cases} 0.326387x - 0.212191, & x \in [0, 0.645]; \\ -0.00556546x + 0.00161786, & x \in [0.645, 0.962] \end{cases}$$

$$\tilde{S}_{5,0.0172}''(x)|_{[0, 0.962]} = \begin{cases} 0.321053x - 0.211139, & x \in [0, 0.645]; \\ 0.00422106x - 0.00678218, & x \in [0.645, 0.962] \end{cases}$$

$$\tilde{S}_{5,0.0173}''(x)|_{[0, 0.962]} = \begin{cases} 0.315720x - 0.209787, & x \in [0, 0.645]; \\ 0.0140076x - 0.0151822, & x \in [0.645, 0.962] \end{cases}$$

Из этого представления следует, что при $z^* = 0.0171$ угловые коэффициенты смежных участков производной S_5'' имеют разные знаки, что говорит о наличии локального максимума второй производной при $x^* = 0.645$ – «потенциально проблемной» зоны, в то время как при $z^* = 0.0172$ и $z^* = 0.0173$ локальный максимум в этой точке отсутствует (рис. 6).

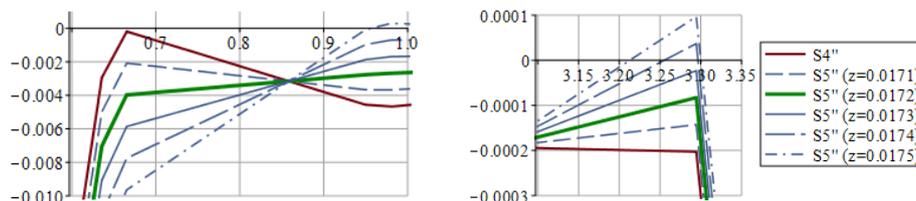


Рис. 6. Построение модели S_5 : уточнение положения узла на основе анализа второй производной

В табл. 3 приведены значения максимума второй производной S_5'' при этих двух значениях z^* : в случае $z^* = 0.0172$ максимум имеет меньшее значение, что означает меньшую вероятность нарушения условия неположительности при дальнейшей корректировке модели. Таким образом, по совокупности двух факторов – величины максимального значения второй производной и отсутствия у неё других локальных максимумов – в качестве оптимального может быть принято значение $z^* = 0.0172$.

Таблица 3

Зависимость максимального значения второй производной S_5'' от величины приращения при вертикальной коррекции положения узла интерполяции

z	0.0172	0.0173
$\max_{x \in (0, 5)} S_5''(x)$	-0.000080	-0.000018

По числовым данным в седьмой строке табл. 4 строится модель S_5 :

$$S_5(x)|_{[0, 5]} = \begin{cases} 1 + 0.0724980x - 0.105570x^2 + 0.0535089x^3, & x \in [0, 0.645]; \\ 1.014170 + 0.00659288x - 0.00339109x^2 + 0.000703510x^3, & x \in (0.645, 0.962]; \\ 1.014510 + 0.00553255x - 0.00228887x^2 + 0.000321592x^3, & x \in (0.962, 2.036]; \\ 1.016591 + 0.00246591x - 0.000782663x^2 + 0.0000749959x^3, & x \in (2.036, 3.301]; \\ 1.153949 - 0.122367x + 0.0370341x^2 - 0.00374372x^3, & x \in (3.301, 5]. \end{cases} \quad (5)$$

Так как вторая производная S_5'' не принимает отрицательных значений, что говорит о полном устранении перегибов на всём отрезке интерполяции (рис. 7,а,в), также первая производная S_5' обращается в нуль в одной точке и при этом монотонно убывает (рис. 7,б), то можно заключить, что модель S_5 удовлетворяет всем заявленным условиям и соответственно может быть принята в качестве окончательной, что говорит о завершении процесса моделирования.

Результаты численного анализа модели S_5 приведены в шестой строке табл. 5, графическое представление с окончательным расположением узлов интерполяции – на рис. 8,а; на рис. 8,б изображена созданная с помощью модуля Surface of Revolution программного пакета Maple трёхмерная визуализация поверхности вращения, построенной по сплайновой модели образующей.

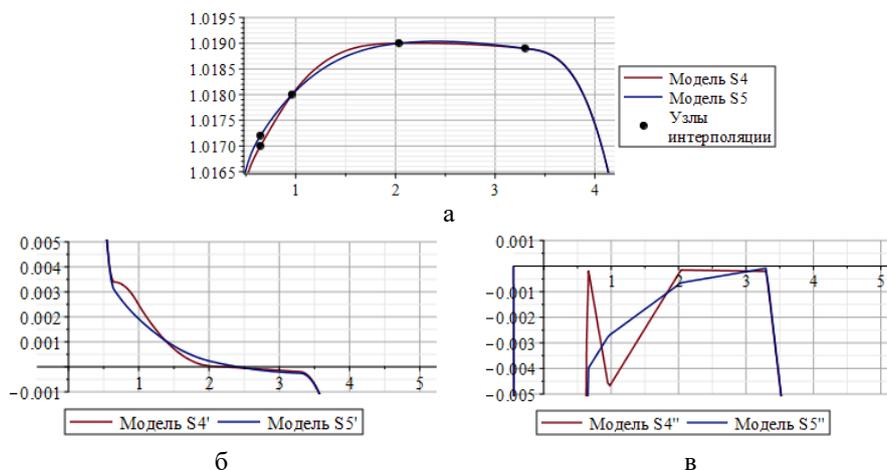


Рис. 7. Сопоставление моделей S_4 и S_5 : а – моделирующая функция (величина одного деления по вертикальной оси составляет 0.0001); б – первая производная; в – вторая производная

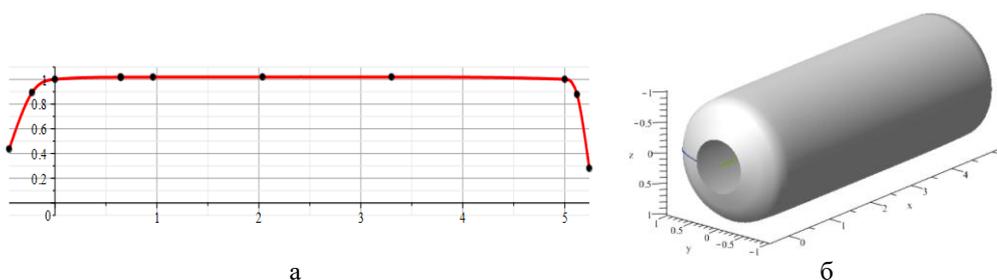


Рис. 8. Результаты моделирования: а – график кубической сплайн-функции S_5 с указанием размещения узлов склеивания (соотношение горизонтального и вертикального масштабов 1:1); б – 3D-поверхность вращения, построенная по модели образующей $S_5(x)$ (Maple)

Таблица 4

Динамика изменения положения узлов склеивания при последовательном уточнении числовых данных (в первой строке – координаты узлов интерполяции по горизонтальной оси, во второй и последующий строках – обозначение модели и координаты узлов по вертикальной оси; выделены изменения относительно предыдущей модели – значения координат добавленных узлов и уточнённые координаты имеющихся узлов)

x_i	-0.450	-0.225	0.000	0.645	0.962	2.036	3.301	5.000	5.120	5.240
S_0	0.436	0.893	1.000	-	-	-	-	1.000	0.877	0.280
S_1	0.436	0.893	1.000	-	-	1.019	-	1.000	0.877	0.280
S_2	0.436	0.893	1.000	-	1.018	1.019	-	1.000	0.877	0.280
S_3	0.436	0.893	1.000	1.017	1.018	1.019	1.018	1.000	0.877	0.280
S_4	0.436	0.893	1.000	1.017	1.018	1.019	1.0189	1.000	0.877	0.280
S_5	0.436	0.893	1.000	1.0172	1.018	1.019	1.0189	1.000	0.877	0.280

Таблица 5

Сопоставление результатов анализа сплайновых моделей, построенных в ходе итерационного процесса уточнения числовых данных: максимальное отклонение, нули первой производной, интервалы положительности и максимум второй производной; 1 – максимальное отклонение в пределах допустимого, 2 – первая производная не осциллирует, 3 – вторая производная всюду неположительна

Модель	δ_{\max}	$S'(x) = 0$	$S''(x) > 0$	$\max S''(x)$	1	2	3
S_0	0.076193	2.036	(4.512, 5.000]	0.005687	-	+	-
S_1	0.032758	0.962, 2.706, 3.703	(1.664, 3.205)	0.025731	-	-	-
S_2	0.023834	0.644, 1.352, 3.301	(0.884, 2.308)	0.015977	-	-	-
S_3	0.019051	1.817	(2.642, 3.380)	0.001946	+	+	-
S_4	0.019002	2.212	(0.644, 0.653)	0.000116	+	+	-
S_5	0.019038	2.410	-	-0.000080	+	+	+

Результаты и их обсуждение. Предложенная в работе методика построения сплайновых приближений в условиях ограниченности исходных данных включает в себя следующие шаги:

- 1) **построение сплайновой модели** по набору числовых данных, определяемых координатами узлов интерполяции;
- 2) численный и качественный анализ модели – выполняется проверка выполнения требований, накладываемых условиями задачи, определяется направление дальнейшей корректировки модели в случае необходимости;
- 3) **определение координат дополнительных узлов интерполяции** – на наиболее «проблемных» участках добавляются новые узлы, их положение определяется исходя из условий максимальной оптимизации модели;
- 4) **коррекция координат имеющихся узлов склеивания** – при нарушении условий в узлах интерполяции изменяется положение узла (в данной статье рассмотрен пример вертикальной коррекции, но возможна также и горизонтальная);
- 5) **анализ чувствительности модели** – исследуется степень влияния вносимых в числовые данные изменений на точность приближения и гладкость функции.

На схеме на рис. 9 отображена последовательность действий при построении сплайновых приближений по данной методике.



Рис. 9. Схема процесса построения сплайнового приближения с уточнением данных

В работе рассмотрено применение методики к приближению функции (1) с помощью кубического сплайна, в результате чего получена модель (5); в табл. 6 приведено сравнение этой модели с моделью, построенной с использованием параметрического линейно-экспоненциального сплайна (2). На основании этого сравнения можно заключить, что каждый из этих методов имеет свои преимущества, при этом использование кубической сплайновой интерполяции позволяет избежать действий с большими и малыми величинами и тем самым снизить вероятность ошибок округления при расчётах.

Таблица 6

Сравнение сплайновых методов моделирования по объёму численной информации и сложности вычислений

Метод моделирования	Количество коэффициентов	Сложность вычислений
Линейно-экспоненциальный сплайн	20	высокая
Кубический сплайн	36	низкая

Ещё одним преимуществом данной методики является достаточно высокая степень формализации пошагового процесса моделирования; это обстоятельство говорит в пользу того факта, что на её основе может быть разработан алгоритм для создания программной реализации, предполагающей возможность задания пользователем исходных числовых данных и дополнительных ограничений, после чего весь процесс построения модели может быть полностью автоматизирован.

Помимо рассмотренной в этой статье задачи интерполяции формы сосудов для хранения веществ под давлением, изготавливаемых на оборудовании с числовым программным управлением, разработанная методика построения сплайновых приближений может быть применена ко многим задачам, имеющим прикладную направленность. Такими, например, являются задачи интерполирования профилей днищ, конструирования схем армирования конструкций из композиционных материалов, формирования траекторий движения рабочих органов четырёхкоординатного станка, где данная методика может быть использована при построении интерполяционных моделей с помощью САПР для получения управляющих программ намотки.

В задачах долгосрочного прогнозирования работы скважин на газоконденсатных месторождениях, на практике часто решаемых в условиях растущего спроса на эффективные методы управления добычей газа [18], данная методика может быть использована для аппроксимации исходных геолого-промысловых данных, а также улучшения точности прогнозов в виде технических приложений, математических моделей и алгоритмов для расчёта прогнозных ресурсов, позволяя таким образом оптимизировать процессы эксплуатации и увеличить общую эффективность добычи газа.

Также может быть оптимизировано решение существующих проблем в инженерных исследованиях: при моделировании напряжённо-деформированного состояния металлических конструкций возможно повышение точности расчётов и определение единиц сложной формы и напряжений в местах их соединений [19].

Заключение. Интегрирование данной методики в состав современных систем автоматизированного проектирования в виде программных модулей позволит расширить функциональность инструментария ПО, а также повысить гибкость процесса моделирования, в связи с чем актуальными являются вопросы исследования и разработки методов, используемых при построении математических моделей с помощью современного специализированного программного обеспечения; в частности, такими могут являться методы расчёта вероятностей связности [20]. Использование полученных результатов может повысить качество образовательного процесса, углубив теоретические значения и практические навыки студентов в вопросах выбора и реализации методов и алгоритмов обработки и анализа данных, численных методов для линейных систем, построения сложных программных приложений с применением объектно-ориентированной технологии и повторного использования кода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дорощев А.А., Бондаренко А.С., Трюхан С.А. Построение образующей поверхности вращения с использованием сплайн-интерполяции // Актуальные проблемы науки и техники. 2025: Матер. Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвящённой 95-летию Донского государственного технического университета (Ростов-на-Дону, 12–14 марта 2025 года) / отв. ред. Н.А. Шевченко. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2025. – С. 635-637. – <https://ntb.donstu.ru/conference2025>.
2. Дорощев А.А., Пожарский Д.А. Интерполяция образующей поверхности вращения методом последовательных L-сплайновых приближений // Проблемы развития современного общества, Сборник научных статей 8-й Всероссийской национальной научно-практической конференции, (19-20 января 2023 года) / под ред. Кузьминой В.М. В 4-х т. Т. 4. – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2023. – С. 187-190. – <https://elibrary.ru/vzvmjkd>.

3. *Зайнидинов Х.Н., Нурмуродов Ж.Н., Гофуржонов М.Р.* Алгоритмы и программы восстановления функций с помощью кубических базисных сплайнов // *Автоматика и программная инженерия.* – 2022. – № 1 (39). – <http://www.jurnal.nips.ru>.
4. *Иродова И.П.* Сплайны в вычислительной математике: учеб.-метод. пособие. – Ярославль: ЯрГУ, 2022. – 44 с. – <http://www.lib.uni-yar.ac.ru/edocs/iuni/20220203.pdf>.
5. *Карпов Д.А., Струченков В.И.* Оптимизация параметров сплайна при аппроксимации многозначных функций // *Russian Technological Journal.* – 2023. – 11 (2). – С. 72-83. – <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-72-83>.
6. *Ахмедов Ю.Х., Асадов Ш.К., Бадиев М.М.* Интерполяция сложных кривых поверхностей сплайн-функциями // *Universum: технические науки.* – 2023. – 3 (108). – <https://doi.org/10.32743/UniTech.2023.108.3.15130>.
7. *Basna R., Nassar H. & Podgórski K.* Spline-based methods for functional data on multivariate domains // *J. Math. Industry.* – 2024. – 14, 13. – <https://doi.org/10.1186/s13362-024-00153-w>.
8. *Sun M., Lan L., Zhu C., Lei F.* Cubic spline interpolation with optimal end conditions // *Journal of Computational and Applied Mathematics.* – 2023. – Vol. 425. – P. 115039. – <https://doi.org/10.1016/j.cam.2022.115039>.
9. *Курасов Д.А., Волоскова М.М., Сабирова Р.Д., Хомутова Е.И., Кутузов А.С.* Исследование метода интерполирования сплайнами и его реализация на языке программирования Python // *Современные наукоёмкие технологии.* – 2024. – № 4. – С. 46-53. – <https://doi.org/10.17513/snt.39972>.
10. *Карпов Д.А., Струченков В.И.* Сплайн-аппроксимация многозначных функций в проектировании трасс линейных сооружений // *Russian Technological Journal.* – 2022. – 10 (4). – С. 65-74. – <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-65-74>.
11. *Струченков В.И., Карпов Д.А.* Использование сплайнов сложной структуры в проектировании дорожных трасс // *Russian Technological Journal.* – 2024. – 12 (1). – С. 111-122. – <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-111-122>.
12. *Рамазанов А.-Р.К., Магомедова В.Г.* О решении начальной задачи для нормальной системы с помощью рациональных сплайн-функций // *Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1. Естественные науки.* – 2023. – Т. 38. – Вып. 1. – С. 33-39. – <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2023-38-1-33-39>.
13. *Ji D., Xue X., Xu Ch.* Truncated total variation in fractional B-spline wavelet transform for micro-CT image denoising // *Journal of X-Ray Science and Technology.* – 2023. – Vol. 31, No. 3. – P. 555-572. – <https://doi.org/10.3233/xst-221326>.
14. *Handajani S.S., Pratiwi H., Respatiwan R., et al.* Comparison of B-Spline and truncated Spline regression models for temperature forecast // *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan.* – 2023. – Vol. 17, No. 4. – P. 1969-1984. – <https://doi.org/0.30598/barekengvol17iss4pp1969-1984>.
15. *Faubert A.C.* Clipping spline: interactive, dynamic 4D volume clipping and analysis based on thin plate spline // *Biomedical Optics Express.* – 2025. – Vol. 16, No. 2. – P. 499. – <https://doi.org/10.1364/boe.544231>.
16. *Cavieres J., Ibacache-Pulgar G., Contreras-Reyes Ja. E.* Thin plate spline model under skew-normal random errors: estimation and diagnostic analysis for spatial data // *Journal of Statistical Computation and Simulation.* – 2023. – Vol. 93, No. 1. – P. 25-45. – <https://doi.org/10.1080/00949655.2022.2090564>.
17. *Einy M., Rashidinia Ja., Ghorbanalinezhad S.* Quintic and Septic C 2-spline methods for initial fractional differential equations // *Journal of Innovative Applied Mathematics and Computational Sciences.* – 2023. – Vol. 3, No. 1. – P. 35-48. – <https://doi.org/10.58205/jiamcs.v3i1.58>.
18. *Толтаев В.А., Ахмедов К.С.* Долгосрочное прогнозирование работы скважин газоконденсатных месторождений методами кубической сплайн-аппроксимации // *Нефтепромышленное дело.* – 2024. – № 9. – С. 10-22. – URL: <https://rucont.ru/efd/904508>.
19. *Yusufov A. et al.* Application of Computer-Aided Design (CAD) Systems when Solving Engineering Survey Tasks // *Universum: технические науки.* – 2023. – 3 (108). – <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15088>.
20. *Иванченко А.Н., Иванченко К.Н.* Метод расчёта вероятности связности двухполюсной сети произвольной структуры // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* – 2023. – № 2. – С. 25-33. – <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2023-2-25-33>.

REFERENCES

1. *Dorofeev A.A., Bondarenko A.S., Tryukhan S.A.* Postroenie obrazuyushchey poverkhnosti vrashcheniya s ispol'zovaniem spлайн-interpolyatsii [Building of a Revolution Surface Forming Using Spline Interpolation], *Aktual'nye problemy nauki i tekhniki. 2025: Mater. Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 95-letiyu Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Rostov-na-Donu, 12–14 marta 2025 goda)* [Actual Problems of Science and Techincs. 2025: materials of All-Russian (national) Scientific and Practical Conference devoted to 95th anniversary of the Don State Technical University (Rostov-on-Don, March 12-14, 2025)], the responsible ed. N.A. Shevchenko. Rostov-on-Don: DGTU, 2025, pp. 635-637. Available at: <https://ntb.donstu.ru/conference2025>.

2. Dorofeev A.A., Pozharskiy D.A. Interpolyatsiya obrazuyushchey poverkhnosti vrashcheniya metodom posledovatel'nykh L-splaynovykh priblizheniy [Interpolation of revolution surface forming by method of successive L-spline approximations], *Problemy razvitiya sovremennogo obshchestva, Sbornik nauchnykh statey 8-y Vserossiyskoy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, (19-20 yanvarya 2023 goda) [The Problems of Modern Society Development, Collection of scientific articles of 8th All-Russian National Scientific and Practical Conference, (January 19-20, 2023)], red. by Kuz'minoy V.M. In 4ur vol. Vol. 4. Kursk: Izd-vo ZAO «Universitetskaya kniga», 2023, pp. 187-190. Available at: <https://elibrary.ru/vzmvjd>.
3. Zaynidinov Kh.N., Nurmurodov Zh.N., Gofurzhonov M.R. Algoritmy i programmy vosstanovleniya funktsiy s pomoshch'yu kubicheskikh bazisnykh splaynov [Algorithms and programs of restoring functions using the cubic basic splines], *Avtomatika i programmnaya inzheneriya* [Automation and Software Engineering], 2022, No. 1 (39). Available at: <http://www.jurnal.nips.ru>.
4. Irodova I.P. Splayny v vychislitel'noy matematike: ucheb.-metod. posobie [Splines in computational mathematics: educational and methodical manual]. Yaroslavl': YarGU, 2022, 44 s. Available at: <http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20220203.pdf>.
5. Karpov D.A., Struchenkov V.I. Optimizatsiya parametrov splayna pri approksimatsii mnogoznachnykh funktsiy [Optimization of spline parameters in approximation of multivalued functions], *Russian Technological Journal*, 2023, 11 (2), pp. 72-83. Available at: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-2-72-83>.
6. Akhmedov Yu.Kh., Asadov Sh.K., Badiev M.M. Interpolyatsiya slozhnykh krivykh poverkhnostey splayn-funktsiyami [Interpolation of Complex Curved Surfaces by Spline Functions], *Universum: tekhnicheskie nauki: elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Universum: Technical Sciences], 2023, 3 (108). Available at: <https://doi.org/10.32743/UniTech.2023.108.3.15130>.
7. Sun M., Lan L., Zhu C., Lei F. Cubic spline interpolation with optimal end conditions, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2023, Vol. 425, pp. 115039. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2022.115039>.
8. Sun M., Lan L., Zhu C., Lei F. Cubic spline interpolation with optimal end conditions, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2023, Vol. 425, pp. 115039. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2022.115039>.
9. Kurasov D.A., Voloskova M.M., Sabirova R.D., Khomutova E.I., Kutuzov A.S. Issledovanie metoda interpolirovaniya splaynami i ego realizatsiya na yazyke programmirovaniya Python [Investigation of the splines interpolation method and its implementation in the Python programming language], *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii* [Modern High-Tech Technologies], 2024, No. 4, pp. 46-53. Available at: <https://doi.org/10.17513/snt.39972>.
10. Karpov D.A., Struchenkov V.I. Splayn-approksimatsiya mnogoznachnykh funktsiy v proektirovanii trass lineynykh sooruzheniy [Spline approximation of multivalued functions in linear structures routing], *Russian Technological Journal*, 2022, 10 (4), pp. 65-74. Available at: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-65-74>.
11. Struchenkov V.I., Karpov D.A. Ispol'zovanie splaynov slozhnoy struktury v proektirovanii dorozhnykh trass [The use of complex structure splines in roadway design], *Russian Technological Journal*, 2024, 12 (1), pp. 111-122. Available at: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-111-122>.
12. Ramazanov A.-R.K., Magomedova V.G. O reshenii nachal'noy zadachi dlya normal'noy sistemy s pomoshch'yu ratsional'nykh splayn-funktsiy [About solution of the initial problem for normal system using rational spline functions], *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1. Estestvennye nauki* [The Dagestan State University Bulletin. Series 1. Natural Sciences], 2023, Vol. 38, Issue 1, pp. 33-39. Available at: <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2023-38-1-33-39>.
13. Ji D., Xue X., Xu Ch. Truncated total variation in fractional B-spline wavelet transform for micro-CT image denoising, *Journal of X-Ray Science and Technology*, 2023, Vol. 31, No. 3, pp. 555-572. Available at: <https://doi.org/10.3233/xst-221326>.
14. Handajani S.S., Pratiwi H., Respatiwiulan R., et al. Comparison of B-Spline and truncated Spline regression models for temperature forecast, *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, 2023, Vol. 17, No. 4, pp. 1969-1984. Available at: <https://doi.org/10.30598/barekengvol17iss4pp1969-1984>.
15. Faubert A.C. Clipping spline: interactive, dynamic 4D volume clipping and analysis based on thin plate spline, *Biomedical Optics Express*, 2025, Vol. 16, No. 2, pp. 499. Available at: <https://doi.org/10.1364/boe.544231>.
16. Cavieres J., Ibacache-Pulgar G., Contreras-Reyes Ja. E. Thin plate spline model under skew-normal random errors: estimation and diagnostic analysis for spatial data, *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2023, Vol. 93, No. 1, pp. 25-45. Available at: <https://doi.org/10.1080/00949655.2022.2090564>.
17. Einy M., Rashidinia Ja., Ghorbanalinezhad S. Quintic and Septic C 2-spline methods for initial fractional differential equations, *Journal of Innovative Applied Mathematics and Computational Sciences*, 2023, Vol. 3, No. 1, pp. 35-48. Available at: <https://doi.org/10.58205/jiamcs.v3i1.58>.

18. Tolpaev V.A., Akhmedov K.S. Dolgosrochnoe prognozirovanie raboty skvazhin gazokondensatnykh mestorozhdeniy metodami kubicheskoy splayn-approksimatsii [Long-term prediction of wells operation in gas condensate fields using cubic spline approximation methods], *Neftepromyslovoe delo* [Oil-field Engineering], 2024, No. 9, pp. 10-22. Available at: <https://rucont.ru/efd/904508>.
19. Yusufov A. et al. Application of Computer-Aided Design (CAD) Systems when Solving Engineering Survey Tasks, *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: Technical Sciences], 2023, 3 (108). Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15088>.
20. Ivanchenko A.N., Ivanchenko K.N. Metod rascheta veroyatnosti svyaznosti dvukhpolyusnoy seti proizvol'noy struktury [Method for calculation of the probability of connectivity of a two-pole network of an arbitrary structure], *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasus Region. Technical Sciences], 2023, No. 2, pp. 25-33. Available at: <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2023-2-25-33>.

Дорофеев Алексей Анатольевич – Донской государственный технический университет; e-mail: AlexeiDorofeyev@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; к.т.н.; доцент кафедры высшей математики; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2496-6691>; AuthorID: https://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=1305339.

Dorofeev Alexei Anatol'evich – Don State Technical University; e-mail: AlexeiDorofeyev@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; cand. of eng. sc.; associate professor of the Department of Higher Mathematics; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2496-6691>; AuthorID: https://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=1305339.

УДК 004.652

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-105-121

А.А. Коблов, О.М. Ромакина, А.С. Клемешева, А.З. Арсеньева

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МУЛЬТИМОДЕЛЬНЫХ ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ В ИГРОВОЙ ИНДУСТРИИ

Проводится исследование целесообразности и эффективности применения мультимодельных баз данных для хранения и обработки данных в игровой индустрии. Современные игровые проекты характеризуются высокой сложностью и разнородностью данных: от строго структурированной информации об игроках, предметах и квестах до слабоструктурированных и сильносвязанных данных, таких как системы рецептов, диалоговые деревья, отношения между кланами и внутриигровые энциклопедии. Существующие подходы, основанные на реляционных или одномоделных NoSQL-хранилищах, часто не обеспечивают необходимой гибкости, производительности и удобства разработки для таких комплексных сценариев. Целью исследования является проектирование и сравнительный анализ производительности мультимодельного решения в контексте типовых игровых механик. Авторами разработана структура мультимодельного хранилища на базе СУБД ArangoDB, которая интегрирует документную, графовую и ключ-значение модели данных. Архитектура решения охватывает ключевые компоненты RPG-игр: управление игроками и инвентарём, систему квестов, диалогов, рецептов крафта, таблиц добычи, клановых взаимоотношений, а также полнотекстовый поиск по внутриигровой энциклопедии с использованием ArangoSearch. Экспериментальная часть включает подробное сравнение производительности разработанного мультимодельного хранилища с реляционной СУБД PostgreSQL и документной MongoDB на реалистичных наборах данных и запросах. Результаты демонстрируют значительное преимущество мультимодельного подхода при выполнении операций, требующих обхода сложных связей: например, поиск враждебных игроков через граф клановых отношений в ArangoDB выполняется в среднем в 11 раз быстрее, чем аналогичный JOIN-запрос в PostgreSQL. В то же время, для сценариев с частыми модификациями линейно организованных данных (например, обновление статуса квестов) мультимодельное хранилище показывает несколько более низкую производительность по сравнению с реляционной моделью, что однако является допустимым в контексте общей архитектуры игрового проекта. Исследование подтверждает, что мультимодельные СУБД, в частности ArangoDB, представляют собой перспективное решение для игровой индустрии, позволяя в рамках единой платформы эффективно комбинировать различные модели данных, упрощать разработку и достигать высокой производительности на сложносвязанных данных, что является критически важным для современных многопользовательских игр.

Мультимодельные хранилища данных; NoSQL модели данных; схемы баз данных; документная модель; графовая модель; реляционная модель; хранилища данных; ArangoDB; разработка игр.

A.A. Koblov, O.M. Romakina, A.S. Klemesheva, A.Z. Arseneva

INVESTIGATION OF APPLICABILITY OF MULTIMODEL DATA WAREHOUSES IN GAMING INDUSTRY

This paper examines the feasibility and effectiveness of using multi-model databases for storing and processing data in the gaming industry. Modern gaming projects are characterized by highly complex and heterogeneous data: from strictly structured information about players, items, and quests to semi-structured and tightly coupled data, such as recipe systems, dialog trees, clan relationships, and in-game encyclopedias. Existing approaches based on relational or single-model NoSQL storage systems often fail to provide the necessary flexibility, performance, and development ease for such complex scenarios. The aim of this study is to design and comparatively analyze the performance of a multi-model solution for typical gaming mechanics. The authors developed a multi-model storage structure based on the ArangoDB DBMS that integrates document, graph, and key-value data models. The solution architecture encompasses key RPG game components: player and inventory management, quest systems, dialogue, crafting recipes, loot tables, clan relationships, and full-text search of the in-game encyclopedia using ArangoSearch. The experimental section includes a detailed performance comparison of the developed multi-model storage system with the PostgreSQL relational DBMS and the MongoDB document DBMS on realistic datasets and queries. The results demonstrate a significant advantage of the multi-model approach when performing operations that require traversing complex relationships: for example, searching for hostile players through a clan relationship graph in ArangoDB is, on average, 11 times faster than a similar JOIN query in PostgreSQL. However, for scenarios with frequent modifications to linearly organized data (e.g., updating quest status), the multi-model storage system exhibits slightly lower performance compared to the relational model, which, however, is acceptable within the context of the overall game project architecture. The study confirms that multi-model DBMSs, particularly ArangoDB, represent a promising solution for the gaming industry, enabling efficient combination of different data models within a single platform, simplifying development, and achieving high performance on complex data, which is critical for modern multiplayer games.

Multi-model data warehouses; NoSQL data models; database schemas; document model; graph model; relational model; data warehouses; ArangoDB; game development.

Введение. Игровая индустрия за последние десятилетия стала значимой частью мировой экономики с многомиллиардным бюджетом. Текущие тенденции роста экономических показателей видеоигровой индустрии демонстрируют перспективность и востребованность этой сферы на мировом рынке программного обеспечения [1].

Одной из задач, с которыми сталкиваются компании при разработке игровых проектов, является проектирование систем хранения игровых данных. Поскольку собственные хранилища, разработанные под конкретные игровые проекты, требуют трудоемкой разработки и дальнейшей поддержки, в проектах с постоянно растущим объемом данных, как правило, предпочтение отдается уже готовым решениям. Ввиду особенностей платформ для обеспечения большей части рынка требуется классическая клиент-серверная архитектура, а значит, необходимо сопровождение огромных баз клиентских данных даже без учета самой игровой архитектуры [2]. Помимо этого, растёт также и разнообразие самих данных, и использование только одного типа СУБД создаёт ограничения и сложности для реализации и поддержки определенных функций.

Данные можно разделить на три вида: структурированные, полуструктурированные и неструктурированные. Для хранения и обработки данных каждого вида требуются отдельные, наиболее эффективные для конкретных задач способы.

В настоящее время существуют два способа хранения вариативных данных: «многовариантное хранение» (polyglot persistence) и мультимодельные системы. Многовариантное хранение представляет собой идею одновременного использования нескольких СУБД для решения задач, где данные будут храниться в подходящем для них месте – отдельных СУБД.

Одним из способов реализации такой идеи является разделение доменного уровня приложения на несколько подуровней таким образом, чтобы каждый подуровень обращался к собственной базе данных. При этом на уровне верхнего домена возникает задача о соблюдении согласованности транзакций [3]. У такого способа организации есть боль-

шое количество существенных недостатков: во-первых, сложность реализации единого способа обращения к хранящимся данным и их дальнейшей обработки, поскольку за разные части данных отвечают разные системы. Ситуация усложняется, если данные сильно связаны. Во-вторых, невозможно в полной мере обеспечить поддержку транзакций и все требования ACID. В-третьих, при увеличении объёма используемых СУБД растёт нагрузка на поддержание стабильной работы БД, т.е. усложняется её масштабирование, затраты на обеспечение оптимальной скорости доступа к данным и т.д. Сложность подобной архитектуры сказывается на производительности, постоянстве и отказоустойчивости системы.

Вторым подходом к хранению разнородных данных являются мультимодельные СУБД, их основное преимущество заключается в возможности поддержки множества различных представлений данных в пределах одной системы. Авторы статьи [4] отмечают, что применению мультимодельных баз данных сопутствует некоторая сложность их поддержки и развития, однако, как утверждается в статье [5], конвергенция разных типов моделей данных необходима из-за постоянно растущего объёма данных различных видов, которые необходимо обрабатывать в рамках одной системы. Единая СУБД для мультимодельных данных удобна тем, что предоставляет не только унифицированный интерфейс запросов, но и единую платформу для уменьшения сложности интеграции и устранения проблем с миграцией [6].

На основе анализа источников [7–10] были выделены несколько основных типов моделей данных, на основе которых создаются мультимодельные СУБД.

- ◆ Иерархические. Данные организованы в виде древовидной структуры, узлы которой связаны между собой отношениями «родитель-ребёнок»: у каждого родителя может быть множество узлов-детей, но у каждого узла-ребенка может быть только один родитель.

- ◆ Сетевые. Здесь связи между узлами представляют собой произвольный граф, что позволяет переходить от одного узла к другому не только вертикально, но и в пределах одного уровня.

- ◆ Реляционные. В этой модели данные упорядочены по строкам и столбцам в таблицах, которые могут быть связаны с другими с помощью первичных и внешних ключей.

- ◆ Графовые. В таких моделях данные организованы в виде связного графа, где узел хранит саму сущность, а ребра – связи между ними.

- ◆ Документные. Здесь данные хранятся в виде документов – сущностей, каждая из которых может иметь уникальную структуру и содержать разное количество полей.

- ◆ Key-value. Данные представлены в виде пары ключ-значение, где каждый ключ является уникальным идентификатором, связанным с конкретной информацией.

- ◆ Колоночные. Схожи по принципу с key-value СУБД, однако каждое «значение» может содержать несколько столбцов и соответствующие им значения, что позволяет удобно хранить связанную информацию. При этом у каждого «значения» может быть свой собственный набор столбцов.

Согласно данным опроса разработчиков Stack Overflow [11], реляционные СУБД являются наиболее популярной моделью организации данных. Иерархические и сетевые модели представления данных со временем были признаны устаревшими и почти не используются [12]. Отдельно стоит отметить обобщающий термин «базы данных NoSQL» или нереляционные СУБД. Такие базы данных не обладают характеристиками, свойственными реляционным СУБД, а также в них не используется стандартный подход с созданием таблиц [13]. У них может не быть жесткой структуры. К этой категории относятся графовые, документные, key-value, колоночные и ряд прочих, менее популярных СУБД.

Мультимодельные СУБД могут поддерживать несколько моделей в различных сочетаниях, например, реляционную и key-value или колоночную, документную и графовую. Некоторые из таких СУБД являются мультимодельными изначально, некоторые имеют основную модель, но обеспечивают поддержку дополнительных [6, 14]. Наиболее подходящие для конкретных задач комбинации моделей в мультимодельных СУБД определяются преимуществами и недостатками каждой модели данных.

Реляционная модель имеет проблемы с производительностью и требует оптимизации при высокой нагрузке сложными операциями, состоящими из нескольких подзапросов. Кроме того, изменение таблиц и добавление новых столбцов проблематично, поскольку требует изменения данных в приложениях, которые обращаются к БД и миграции существующих данных [15].

Графовая модель незаменима в хранении и обработке высокосвязных данных, она демонстрирует высокую производительность при локальном чтении во время перемещения по графу [16]. Из недостатков графовой модели можно выделить отсутствие стандартизированного языка запросов.

Документные модели представления данных обладают очень высокой производительностью и возможностью масштабирования, поскольку формат хранимых данных спроектирован таким образом, чтобы данные можно было найти и извлечь за минимально возможное время. Недостатком этих моделей является ограниченная поддержка транзакций. Документные модели также неэффективны, если данные приходится часто обновлять, поскольку для этого потребуется заново сохранять всю структуру [17].

Key-value модель способна хранить любую информацию, будь то JSON, бинарные или любые другие данные. Key-value модель имеет высокую производительность при поиске конкретных ключей, однако эта производительность сильно падает, если необходим поиск по нескольким ключам [18]. Также модель этого типа имеет крайне ограниченный набор операций для работы с хранимыми данными.

Некоторые игровые проекты успешно работают с NoSQL-хранилищами, например, компания Epic Games для хранения данных в игре Fortnite использует MongoDB [19]. Другим вариантом хранения информации в игровой индустрии является использование частично мультимодельного подхода, за счёт возможностей одномодельных баз данных. Разработчики Аллоды и Skyforge отмечали, что реляционная модель имеет ряд значимых недостатков, которые можно преодолеть только используя связку реляционных возможностей с нереляционными. Разработчиками было решено создать несколько столбцов, работающих в качестве хранилищ для данных в документном стиле, поскольку эти данные сильно связаны друг с другом и редко меняются по отдельности [20].

Несмотря на потенциальные преимущества мультимодельных СУБД над одномодельными, не было найдено публичных примеров их использования в игровых проектах. Компании в своих продуктах, как правило, используют одномодельные СУБД. Большая часть проектов работает с реляционной моделью [21], например, такие проекты как Eve Online [22] или World of Warcraft [23]. С точки зрения Abdullah Alqwbani и др. [24] использование реляционной модели будет наиболее подходящим решением для хранения такой информации, как, например, данные аккаунтов, поскольку таких данных не так много, все они должны храниться наиболее безопасным образом и не требуют сложной аналитики. Однако, как подчёркивает автор статьи [25], реляционные СУБД в их стандартном виде неудобны при хранении игровых объектов, поскольку для выстраивания связей необходимо будет создавать транзакцию на несколько таблиц.

Таким образом, можно заметить, что в игровой отрасли наблюдается потребность в одновременном использовании нескольких моделей данных в рамках одного проекта. Целью настоящей работы является исследование применимости мультимодельных СУБД в игровой индустрии и оценка эффективности такого решения.

Материалы и методы. Игровые проекты делятся на однопользовательские и многопользовательские. Согласно отчёту, собранному компанией Unity в 2024 году [26], 77% всех игроков предпочитают многопользовательские игры. Согласно отчёту компании Newzoo [27], топ жанров по доходу возглавляют шутеры, адвенчуры и RPG. За последние 20 лет в рамках этих жанров было создано большое количество игр, что позволяет на их основе выделить наиболее часто используемые компоненты и механики, данные которых требуется хранить и отправлять игрокам по необходимости.

Таковыми компонентами в большинстве игр являются:

- ◆ Неигровые персонажи (NPC). Их данные включают характеристики здоровья, урона, типа (дружественный, нейтральный или враждебный), а также таблицы добычи, определяющие, какую награду игрок получит за победу над ними. Таблица состоит из идентификаторов предметов, которые могут выпасть, и частоты их выпадения.

- ◆ Система квестов. Квесты могут содержать как одну, так и несколько задач, например, «выковать меч у кузнеца» и «купить яблоко на рынке». Квесты могут быть повторяющимися или неповторяющимися, как правило, имеют название, описание, а их выполнение может давать игроку награду и/или опыт. Квесты могут быть объединены в цепочки, таким образом по завершении одного квеста игроку выдаётся новый.

- ◆ Система диалогов. Диалоги состоят из инструкций – запрограммированных последовательностей из действий, реплик NPC, внутриигрового видео и т.д. В случае учета и анализа ответных фраз игрока, система диалогов будет иметь нелинейный характер.

- ◆ Предметы. Содержат такую информацию как название, описание, характеристики и прочие параметры, набор которых одинаков для всех экземпляров данного предмета.

- ◆ Инвентарь. Список экземпляров предметов, принадлежащих конкретному игроку, существу или объекту в мире. В экземплярах, помимо ссылки на предмет, могут быть ещё и уникальные данные – пользовательское название или редкость.

- ◆ Система рецептов. Часто в игровые проекты добавляют возможность создавать предметы по рецепту или улучшать их с помощью некоторых компонентов, превращая в другие.

- ◆ Внутриигровая энциклопедия. Как правило, разделена на категории и имеет возможности поиска по ключевым словам.

Помимо основных сюжетных компонентов, игровые проекты зачастую включают в себя системы, повторяющиеся в играх вне зависимости от жанра, поскольку носят либо утилитарный характер, либо необходимы для внутриигрового социального взаимодействия. К ним относятся системы сбора статистических данных, доски лидерства, списки друзей, кланы и другие внутриигровые сообщества. В играх с подобными компонентами также может быть реализована система подбора игроков схожего уровня для совместных испытаний или сражений друг против друга.

Для реализации мультимодельной БД и оценке эффективности данного подхода применительно к наиболее популярным игровым механикам необходимо выбрать СУБД для реализации баз данных в различных моделях и последующего анализа времени выполнения наиболее популярных запросов.

В качестве реляционной СУБД для проведения экспериментов выбрана PostgreSQL, как одна из наиболее популярных среди реляционных СУБД [28]. PostgreSQL обладает высокой мощностью и рассчитана на работу с огромными массивами информации, а также имеет библиотеки для подключения из различных языков программирования.

Для тестирования документной модели была выбрана MongoDB, поскольку она также имеет набор библиотек для подключения и является кроссплатформенной БД.

Эксперименты на графовых СУБД и сравнение быстродействия выполнения запросов к графовой БД и мультимодельной БД не проводились, что обусловлено следующими обстоятельствами. Во-первых, в силу существенного различия архитектур графовых СУБД (Property Graph и RDF-граф), отсутствия унифицированного языка запросов и единой концепции поддержания целостности, необходимо проведение отдельного исследования принципиальной возможности реализации различных типов запросов в существующих графовых СУБД, а также скорости выполнения реализованных запросов. Во-вторых, с ростом объема графа, а также увеличением количества взаимосвязей в нем, скорость выполнения различных запросов на графе нелинейно снижается, причем снижается различным образом в графах с разной архитектурой, что также требует дополнительных исследований. Очевидно, перечисленные исследования выходят за рамки данной работы.

Наиболее популярными СУБД, которые изначально проектировались как мультимодельные, являются CosmosDB, OrientDB и ArangoDB.

CosmosDB - это облачная мультимодельная СУБД с автоматической масштабируемостью. Поддержка различных моделей данных реализуется здесь с помощью набора API для наиболее популярных СУБД. С помощью этих API можно представлять данные требуемым способом, однако CosmosDB является скорее единой интегрированной оболочкой различных API, а не полноценной мультимодельной СУБД [29].

OrientDB и ArangoDB по своей структуре сильно отличаются от CosmosDB. Они позволяют хранить данные в документной и графовой модели данных, а также поддерживают принципы ACID и транзакции. OrientDB отличается возможностью поддержки классов с свойствами и наследованием.

ArangoDB для запросов использует свой собственный язык – AQL (ArangoDB Query Language). За счёт того, что этот язык создан специально для мультимодельных задач, он является достаточно гибким при работе данными, принадлежащими разным моделям. Отдельно стоит отметить анализ производительности, проведённый разработчиками ArangoDB [30]. Тестирование на чтение, запись, агрегацию, занимаемую память, а также на специфичные для поиска по графам запросы показали значительное преимущество по отношению к OrientDB. Это также подтверждается в статье [31]. Для анализа применимости мультимодельных СУБД в игровой отрасли было принято решение использовать ArangoDB.

Для демонстрации возможностей мультимодельной СУБД в рамках игровой отрасли, был разработан пример базы данных для хранения информации об основных игровых компонентах и механиках типовой RPG, а также подготовлен набор наиболее часто используемых запросов. К сожалению, возможности создания схемы данных по аналогии с привычной реляционной схемой данных в ArangoDB не предусмотрено по причине отсутствия нотации для моделирования мультимодельных БД.

Поскольку стандартное общепринятое наименование объекта, именуемого «сущностью» в реляционных БД или «коллекцией» в документных БД, в мультимодельных БД также отсутствует, то далее, во избежание двусмысленностей и неоднозначного понимания, будем именовать такой объект «коллекцией».

Основными коллекциями разработанного хранилища являются clans (кланы), instructions (инструкции), items (предметы), loot_tables (таблицы добычи), players (игроки), players_clans (принадлежность игроков к кланам), quests (квесты), recipes (рецепты), wiki (игровая энциклопедия). Их назначение и структура далее будут рассмотрены подробно.

Проектирование основных компонентов хранилища.

Основные коллекции в разработанном хранилище – items и players.

Коллекция items необходима для хранения описаний предметов. Описание предмета состоит из уникального идентификатора, его названия, а также любой метаинформации, которая будет полезна для создания экземпляров этого предмета, например, качество предмета или прочность у инструментов и оружия. Экземпляр предмета – это конкретный объект, который имеет все свойства, указанные в определении предмета, но представляет собой его конкретное воплощение.

Коллекция players хранит информацию об игроке, являющемся центральным элементом таких игровых направлений, как шутеры, адвенчуры и RPG. Ключом является никнейм, поскольку он уникален, а экземпляр игрока (или документ) в этой коллекции может включать в себя инвентарь (список предметов, который носит игрок и использует по мере надобности), параметры игрока (уровень, количество опыта, здоровья, позиция и т.д.), открытые навыки, активные эффекты и прочее.

Рассмотрим следующую популярную игровую механику: систему рецептов. Для ее реализации создадим коллекцию ребер recipes, которая будет содержать связи между предметами из коллекции items с направлением от ингредиентов к результату рецепта. Поскольку некоторые рецепты могут требовать несколько экземпляров предмета, необходимо сохранять требуемое количество как атрибут ребра. ArangoDB имеет уникальные возможности визуального представления объектов БД в различных форматах. Способ визуализации объекта можно выбрать в зависимости от текущей задачи, стоящей перед разработчиком. Так, например, объект recipes можно представить как в виде графа, так и в виде, характерном для документной модели (рис. 1 и 2).

Наиболее частыми запросами к системе рецептов будут следующие: «Получить все предметы, которые можно создать из имеющегося набора ингредиентов», «Получить все рецепты, содержащие указанный ингредиент», «Получить все ингредиенты, требуемые для создания конкретного предмета». Наилучшей моделью данных для оптимального выполнения подобных запросов является графовая модель, для ее реализации был создан

граф recipes. Тогда для выполнения запроса «Получить все предметы, которые можно создать из имеющегося набора ингредиентов», код которого приведен в [32], в качестве входных данных необходимо передать список объектов «item» с атрибутами «id» предмета и «count» (количество предметов). Результатом выполнения запроса будет список рецептов, которые можно сделать из всех указанных ингредиентов. Пример параметров запроса, а также его результат представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Т.е. в параметрах было указано, что имеется 7 досок и 5 кремней, в результате выполнения запроса получено, что из данных ингредиентов можно изготовить верстак и плиты.

```
Content

{"_from":"items/flint","_id":"recipes/2361","_key":"2361","_rev":"_h1h5P_u---","_to":"items/workbench","count":3}

{"_from":"items/planks","_id":"recipes/5286","_key":"5286","_rev":"_h1h5x1G---","_to":"items/slab","count":2}

{"_from":"items/wood","_id":"recipes/2307","_key":"2307","_rev":"_h1h53jC---","_to":"items/planks","count":1}

{"_from":"items/planks","_id":"recipes/2335","_key":"2335","_rev":"_h1h58f0---","_to":"items/workbench","count":6}

{"_from":"items/workbench","_id":"recipes/8984","_key":"8984","_rev":"_h1huyEC---","_to":"items/superbench","count":1}
```

Рис. 1. Документное представление коллекции recipes

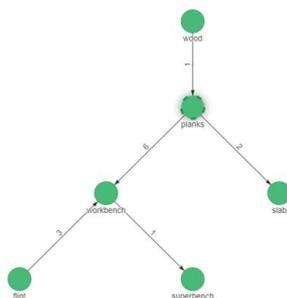


Рис. 2. Графовое представление коллекции recipes

```
1 {
2   "items": [
3     {
4       "item": "items/planks",
5       "count": 7
6     },
7     {
8       "item": "items/flint",
9       "count": 5
10    }
11  ]
12 }
```

Рис. 3. Параметры запроса на поиск подходящих рецептов

```
1 [
2   [
3     {
4       "result": "items/workbench",
5       "ingredients": [
6         {
7           "item": "items/planks",
8           "count": 6
9         },
10        {
11          "item": "items/flint",
12          "count": 3
13        }
14      ]
15    },
16    {
17      "result": "items/slab",
18      "ingredients": [
19        {
20          "item": "items/planks",
21          "count": 2
22        }
23      ]
24    }
25  ]
26 ]
```

Рис. 4. Пример результата запроса на поиск подходящих рецептов

Второй и третий запрос из перечня выше аналогично используют поиск по графу, только в качестве параметра запроса необходимо предоставить идентификатор конкретного предмета.

Аналогичным образом была спроектирована система таблиц добычи ресурсов. Для хранения таблиц добычи была задействована документная модель данных, входящая в состав мультимодельной СУБД ArangoDB. Благодаря языку запросов AQL, расчёт таблиц добычи был произведен встроенными средствами СУБД без использования сторонних языков программирования. Наиболее популярными запросами здесь будут следующие: «Получить случайный набор ресурсов по настроенной таблице добычи» и «Показать шанс выпадения определённого предмета и его количества». Код этих запросов и структура коллекций системы добычи ресурсов приведены в [32].

Для проектирования системы внутриигровой энциклопедии была использована встроенная система анализа текстов ArangoSearch, являющаяся одним из преимуществ ArangoDB по отношению к прочим СУБД данного класса. Хранение справочной информации будет осуществляться с использованием документной модели данных в коллекции wiki, состоящей из документов, представляющих собой статьи со свойствами «title» (название), «description» (описание) и «tags» (теги). Поиск будет выполняться как по названию, так и по тегам. Теги не являются обязательными, однако позволяют связывать определённые слова или фразы со статьями, которые не содержат указанных слов или фраз непосредственно, но являются единственными источниками информации по искомой теме. Пример статьи приведен на рис. 5.

Для корректной работы ArangoSearch необходимо создать и настроить для последующего поиска представление коллекции wiki, после чего можно строить запросы с помощью фразового анализатора. Код запроса на поиск информации во внутриигровой энциклопедии приведен в [32]. Запрос принимает на вход любое словосочетание, и если совпадение по названию или тегу является полным, то найденная статья отображается в качестве результата. Если же полные совпадения отсутствуют, то осуществляется поиск подстроки, где подстрокой является искомое словосочетание. Например, по названию «Draconium» показываются все статьи, так или иначе с ним связанные (рис. 6), однако если ввести «Ore», то результатом будет статья с рис. 5.

```

1- {
2  "title": "Basics",
3- "tags": [
4  "Draconium Ore"
5  ],
6  "description": "The very basis of Draconic
  Research. This ore can be found in the overworld
  below y-level 8 as well as in The Nether at any
  y-level, although it is extremely rare in both.
  You can also find it in much larger quantities
  in The End, both in the main island and in the
  comets that randomly spawn throughout The End.
  Drops 1 - 3 Draconium Dust when mined. This can
  be increased up to 4 - 12 with the Fortune III
  enchantment."
7 }

```

Рис. 5. Пример статьи внутриигровой энциклопедии

title	description
Basics	The very basis of Draconic Research. This ore can be found in the overworld below y-level 8 as well as in The Nether at any y-level, although it is extremely rare in both. You can also find it in much larger quantities in The End, both in the main island and in the comets that randomly spawn throughout The End. Drops 1 - 3 Draconium Dust when mined. This can be increased up to 4 - 12 with the Fortune III enchantment.
Draconium Dust	This is the dust dropped when mining Draconium Ore. It can be smelted into Draconium Ingots.
Draconium Ingot	The product of smelting Draconium Dust in a furnace. Used in most Draconic Evolution recipes.

Рис. 6. Вывод статей по запросу ArangoSearch

Аналогично системе внутриигровой энциклопедии, документная модель данных может быть применена для реализации системы подбора игроков. Такая система пригодится для поиска соперников в матчах или союзников для похода в подземелье. Главная цель такой системы – получить ближайших по уровню игроков или игроков, уровень которых находится в заданном диапазоне, при этом игрок должен быть «онлайн», то есть присутствовать в игре в данный момент. Как и ранее, необходимо создать и настроить для последующего поиска представление коллекции players, после чего можно формировать запросы, используя команду search фразового анализатора. На вход разработанного запроса [32] в ArangoSearch подаётся никнейм игрока, для которого нужно произвести подбор, результатом запроса является перечень подходящих игроков. Так, например, для игрока, чьи параметры приведены на рис. 7, ближайшим по уровню игроком, находящимся онлайн, будет игрок, имеющий данные, приведенные на рис. 8.

```

_id: players/Time_Conqueror
_rev: _h2Pxxz----
_key: Time_Conqueror

1- {
2-   "inventory": [
3-     {
4-       "item": "items/stone",
5-       "count": 5,
6-       "data": {}
7-     },
8-     {
9-       "item": "items/wood",
10-      "count": 6,
11-      "data": {}
12-     }
13-   ],
14-   "params": {
15-     "pos": [
16-       100,
17-       200,
18-       300
19-     ],
20-     "level": 54,
21-     "experience": 58000
22-   },
23-   "online": true
24- }
    
```

Рис. 7. Пример документа коллекции players

```

1- [
2-   {
3-     "name": "player3000"
4-     "level": 53
5-   }
6- ]
    
```

Рис. 8. Пример данных игрока, подобранного системой

Чтобы выяснить преимущества мультимодельных СУБД по отношению к одно- модельным, необходимо рассмотреть примеры, в которых имеются отличающиеся друг от друга критерии работы с данными.

Первый эксперимент был проведён на квестовой системе. Типовые запросы здесь – это добавление игроку нового активного квеста, завершение квеста, получение всех активных и завершённых квестов игрока для отображения на его стороне, а также проверка, выполнен ли квест у игрока.

Выбранные для тестирования структуры одно-модельных СУБД представлены на рис. 9 и 10. Для MongoDB и ArangoDB были созданы коллекции players (users) и quests. В случае с документной моделью было принято решение о хранении активных и завершённых квестов внутри документа игрока (рис. 11). Такой же подход можно было бы использовать и в мультимодельной БД, однако было принято решение провести эксперимент со связующей коллекцией players_quests. Эксперимент проводился на выборке из 20000 игроков, 50000 квестов, у каждого игрока в среднем 3000 завершённых квестов, 50 активных. Результаты эксперимента приведены в табл. 1 раздела Результаты.

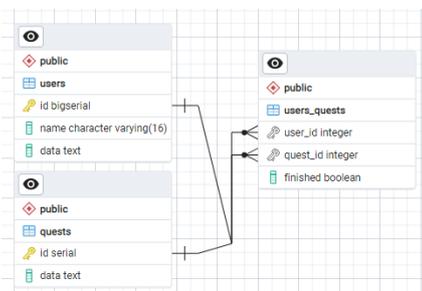


Рис. 9. Система квестов в реляционной БД (PostgreSQL)

quests	users
Storage size: 29.04 MB	Storage size: 618.50 kB
Documents: 50 K	Documents: 1 K
Avg. document size: 661.00 B	Avg. document size: 1.11 kB
Indexes: 1	Indexes: 1
Total index size: 765.95 kB	Total index size: 24.58 kB

Рис. 10. Система квестов в документной БД

```

_id: ObjectId('662ad91aed9bb29fcffaacc6')
name: "ONXVISJYHKPROZTT"
▶ active_quests: Array (70)
▶ finished_quests: Array (3050)

```

Рис. 11. Пример документа players

Следующий компонент игровых проектов – возможность создавать кланы. Кланом владеет какой-либо игрок, который может приглашать в него других игроков, а также выдавать им специальные роли. Помимо этого, кланы могут враждовать друг с другом. Игроки в таком случае могут атаковать игроков из враждебного клана.

Для хранения таких данных в реляционной БД потребуется четыре таблицы: players, clans, players_clans, clans_relations (рис. 13), SQL-запрос о враждебности конкретного игрока приведен в [32].

Чтобы хранить такую информацию в мультимодельной СУБД, также необходимо иметь коллекции players и clans, а также коллекцию связей players_clans, в которой будут храниться принадлежность игроков к кланам, а также отношения между самими кланами. Чтобы найти, враждуют ли два игрока, нужно пройти по графу на 3 вершины вперёд (игрок принадлежит клану, клан относится к клану, клану принадлежит игрок, см. рис. 13). AQL-запрос о враждебности конкретного игрока также приведен в [32].

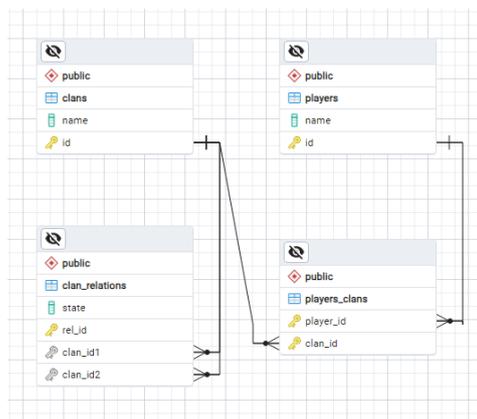


Рис. 12. Схема в PostgreSQL для системы кланов

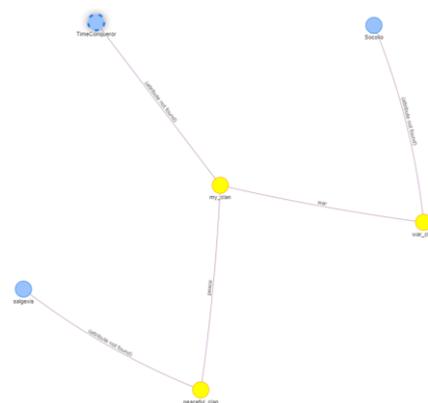


Рис. 13. Пример графа для поиска враждебных игроков. Голубым цветом отмечены игроки, желтым – кланы

Эксперимент по сравнению средней скорости ответа проведён на выборке из 230000 игроков и 7000 кланов. Сравнение средних скоростей запросов для поиска враждебных игроков в реляционной и мультимодельной БД приведены в табл. 2 раздела Результаты.

Далее была рассмотрена система диалогов, которая встречается в большинстве игр. Диалоги – это последовательность инструкций, каждая из которых обладает уникальным идентификатором и набором ссылок на идентификаторы следующих инструкций вместе с предикатами, указывающими, может ли следующая инструкция быть запущена, учитывая некоторые параметры. Инструкция может принадлежать только одному диалогу.

Если рассматривать структуру диалогов в рамках реляционной СУБД, то необходимо создать две таблицы: instructions, которая содержит в себе сами инструкции и instruction_links, реализующую связи между инструкциями (рис. 14).

Рассмотрим два варианта того, как запрашивать данные диалога из реляционной БД, приведенной на рис. 14. Первый из них – отправить в запросе идентификатор стартовой инструкции и от неё найти все следующие инструкции, принадлежащие одной последовательности до тех пор, пока ссылка на следующую инструкцию не будет равна null. Для реляционной базы данных задача извлечения информации из таблицы, структура которой имеет иерархическую рекурсию – крайне сложная и трудоёмкая. Следовательно, в данном случае все

данные в рамках одного диалога проще хранить в запакованном виде в одном столбце. Однако этот способ предполагает накладку по производительности, так как частая выгрузка объемных данных будет довольно медленной. В таких случаях данные можно закешировать и хранить в памяти вызывающего приложения, однако и это приведёт к большому количеству занимаемой памяти в случае большого количества игроков.

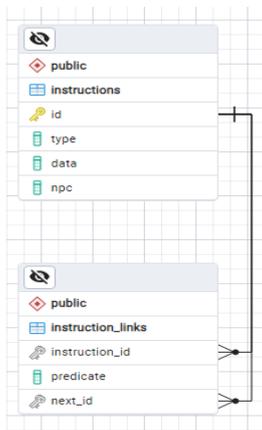


Рис. 14. Структура реляционной БД для диалоговой системы

Если диалоговую систему проектировать в мультимодельной СУБД, то имеет смысл хранить её в рамках документной модели, где каждый документ содержит в себе все инструкции (рис. 15). При этом легко решается вопрос с тем, что реплики NPC ограничиваются единственной строкой текста, в то время как ответов игрока может быть несколько – компонент data можно хранить как в виде строки, так и в виде массива строк. Компонент next, отвечающий за выбор следующих инструкций, также является массивом, где каждый элемент может хранить в себе условие для перехода – predicate. Если поле условия отсутствует, то следующий идентификатор инструкции рассматривается как путь по умолчанию. Такой формат хранения данных вместе с использованием мультимодельной СУБД позволяет удобно и в тоже время эффективно извлекать нужную информацию, а также устраняет необходимость дополнительного кеширования.

```

1  {
2  "instructions": [
3  {
4    "id": 0,
5    "type": "npc_text",
6    "data": "Привет, путник!",
7    "next": [
8      {
9        "id": 1
10     }
11   ]
12  },
13  {
14    "id": 1,
15    "type": "player_answer",
16    "data": ["И тебе привет!", "Промолчать"],
17    "next": [
18      {
19        "id": 2
20      },
21      {
22        "predicate": ["silence_potion", "chosen_2"],
23        "id": null
24      }
25    ]
26  },
27  {
28    "id": 2,
29    "type": "action",
30    "data": "npc_go_away",
31    "next": [
32      {
33        "id": null
34      }
35    ]
36  }
37 ]
38 }

```

Рис. 15. Пример хранения в документном стиле для диалоговой системы

Результаты. Рассмотрим подробнее результаты проведенных экспериментов.

Исследование быстродействия типовых запросов к квестовой системе показало, что реляционная база данных справляется с задачей извлечения квестов для конкретного игрока приблизительно с той же скоростью, что и документная база данных, однако добавление и изменение информации в случае использования реляционной БД происходит значительно быстрее (табл. 1). Это также является следствием того, что при выполнении основных вышеперечисленных запросов нет необходимости извлекать информацию о квестах частями, так как для отображения результатов запросов на стороне клиента нужна полная информация о квестах.

Несмотря на возможность ArangoDB работать с графовыми представлениями, при проведении тестов возникла проблема с отбором квестов конкретного игрока, причём чем больше было квестов у игрока, тем дольше длился запрос. По сравнению с реляционной и документной базами данных разница во времени выполнения запросов существенная. Для решения проблемы быстродействия были предприняты попытки добавления индексов в графовое представление, однако ввиду того, что квесты, хранимые в связях, по статистике почти всегда будут существенно преобладать над активными квестами, индексы не исправят проблему.

С точки зрения игровой логики представляется разумным запрашивать информацию о квестах игрока в момент входа пользователя в игру. Пока квест активен, системе нужна вся информация о квесте, при этом часть данных нужна для отображения на стороне пользователя, часть – для серверной логики. Таким образом, в квестовой системе не требуется запрашивать какие-либо характеристики отдельно, а, следовательно, реляционная БД в этом случае будет иметь преимущество. Мульти модельная же СУБД (при структуре документной базы данных) демонстрирует преимущество в скорости при добавлении и изменении данных, то есть при необходимости миграции на мульти модельную СУБД или изначальной реализации БД в мульти модельной СУБД, сильного ухудшения производительности в данном случае не ожидается.

Таблица 1

Сравнение средней скорости запросов для разных моделей (ms)

	Реляционная	Документная	Мульти модельная	Мульти модельная (ArangoDB, документная модель)
Добавление активного квеста игроку	0,56	2,76	1,4	1,4
Перевод квеста в статус «Завершён»	0,66 (с индексом по user_id и quest_id)	4,084	4	1,8
Получить все активные квесты игрока	1,09	1,874	4,69	1,4
Получить все завершённые квесты игрока	1,917	1,76	8,3	1,4
Завершён ли квест у игрока	0,5	1,573	1,45	1,3

Результаты сравнения производительности системы кланов представлены в табл. 2. Как можно заметить, реляционная СУБД многократно уступает мульти модельной в случае наличия нескольких соединений между объемными таблицами. Графовая же модель, являющаяся частью мульти модельной СУБД, позволяет эффективно решать такие задачи. Необходимо отметить, что ArangoDB реализует архитектурную модель Property Graph.

Таблица 2

Средняя скорость запроса реляционной и мультимодельной СУБД для поиска враждебных игроков (ms)

	Реляционная	Мультимодельная (ArangoDB, графовая модель)
Поиск враждебных игроков	57.6	5

Как видно из приведенной таблицы, мультимодельная БД, используя поиск на графе, значительно выигрывает в производительности. Отметим, что ранее в примере с подбором подходящего игрока коллекция игроков была представлена с помощью документной модели. В случае использования двух одноmodelных СУБД для реализации, было бы необходимо решать проблему синхронизации данных двух БД. В случае же использования мультимодельного подхода на одни и те же данные можно смотреть с разных точек зрения и выбирать наиболее подходящее представление данных для решения текущей задачи, что, в свою очередь, повышает эффективность выполнения запросов.

Обсуждение. Экспериментальная часть исследования показала, что в случае, когда данные необходимо часто добавлять и изменять, а схема данных имеет структуру, близкую к линейной и выполнение запросов не требует многочисленных операций соединения, мультимодельная СУБД проигрывает реляционной по производительности, в особенности это касается внешних запросов больших массивов данных. Тем не менее, указанное обстоятельство не является препятствием к применению мультимодельных СУБД в игровой индустрии в случае, если при этом они активно используются для решения иных задач, возникающих в данной предметной области и задействуют различные модели данных.

Так, например, игровым проектам для хранения информации зачастую необходимо использовать графовую модель. Реляционная СУБД частично может покрыть эту необходимость ценой резкого снижения производительности и значительного увеличения сложности запросов, однако мультимодельная СУБД показывает лучшие результаты и позволяет покрыть большее количество потребностей. При этом мультимодельные СУБД показывают хорошие результаты и при обращении к данным, хранящимся в документной модели, что является их несомненным преимуществом, поскольку часть игровой информации удобно хранить именно в документном формате.

Помимо прочего, в работе был проведён анализ производительности и удобства использования мультимодельных СУБД по сравнению с одноmodelными. Анализ показал, что мультимодельный подход имеет значительные преимущества в игровой области на большем количестве компонентов, чем одноmodelные аналоги и позволяет в рамках одной базы данных: а) создавать отношения между документами одного типа, б) эффективно работать с графовой моделью, в) строить комплексные запросы к документной модели. Также существует возможность использования модели «ключ-значение» для хранения, например, игровых логов, что реализуемо в рамках ArangoDB. Отдельно стоит отметить удобство и универсальность языка запросов AQL, являющегося неотъемлемым компонентом ArangoDB, а также специализированный поисковый движок ArangoSearch, упрощающий написание запросов.

Из недостатков использования ArangoDB стоит отметить сложность просмотра графовых данных, поскольку встроенный визуализатор имеет довольно скудное количество возможностей: нельзя выделять и передвигать группы компонентов и связей, а также быстро повторно сгенерировать получившийся граф. Собственно связи в графе часто визуализируются неоптимальным образом, оставляя большое количество неиспользуемого пространства (см. рис. 13).

В ходе анализа были выявлены случаи, когда мультимодельная БД проигрывает в производительности другим моделям, например, при выстраивании связей между элементами коллекции разных типов через специальную коллекцию рёбер, что оказалось менее эффективным, чем использование изначально документного подхода.

В рамках работы было проведено исследование применимости мультимодельных СУБД в рамках игровой индустрии и разработана структура мультимодельного хранилища на базе ArangoDB для наиболее часто использующихся игровых механик, систем и

компонентов. Исследование продемонстрировало, что разные компоненты системы ввиду специфики рассматриваемой области зачастую требуют как запросов к графовой модели, так и хранения данных в виде документов.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на сравнение нескольких мультимодельных СУБД друг с другом с учётом особенностей различных предметных областей и анализ эффективности выполнения графовых запросов в зависимости от используемой архитектурной модели, плотности графа и объема хранимых данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Листьев Д.С., Савина А.Г., Малявкина Л.И.* Тенденции развития игровой индустрии // Цифровые инструменты обеспечения устойчивого развития экономики и образования: новые подходы и актуальные проблемы. – 2022. – С. 69-75.
2. *Кишкевич Д.В., Нестеренков С.Н., Марков А.Н.* Применение технологии Big Data в игровой индустрии = Application of Big Data technology in the game industry // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11–12 мая 2022 г. Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: В.А. Богущ [и др.]. – Минск, 2022. – С. 120-124.
3. *Khine P.P., Wang Z.* A review of polyglot persistence in the big data world // Information. – 2019. – Vol. 10, No. 4. – P. 141.
4. *Holubová I., Vavrek M., Scherzinger S.* Evolution management in multi-model databases // Data & Knowledge Engineering. – 2021. – Vol. 136. – Art. 101932.
5. *Mihai (Rizescu) G.* Multi-Model Database Systems: The State of Affairs // Annals of Dunarea de Jos University of Galati. Fascicle I. Economics and Applied Informatics. – 2020. – Vol. XXVI. – P. 211-215.
6. *Lu J., Holubova I.* Multi-model Databases: A New Journey to Handle the Variety of Data // ACM Computing Surveys. – 2019. – Vol. 52, No. 3. – P. 1-38.
7. *Лапуценко А.В., Ключкова М.В.* Особенности различных систем управления базами данных // Потенциал российской экономики и инновационные пути его реализации. – 2022. – С. 337-342.
8. *Jowan S.A., Faraj Swese R., Yousf Aldabrzi A., Saad Shertil M.* Traditional RDBMS to NoSQL Database: New Era of databases for Big Data // Journal of Humanities and Applied Science. – 2016. – Vol. 29.
9. *Алексеев А.М., Борозна В.С., Суружий Н.А.* Системы управления базами данных. Классификация систем управления базами данных. – 2023.
10. *Карпюк А.Д., Власенкова Д.Г.* Какие виды СУБД и их реализации существует и что подходит лучшим образом для разработки автоматизированных информационных систем? // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. науч. ст. по итогам Четвертой междунар. науч. конф., Казань, 29–30 апреля 2020 года. В 2 ч. Ч. 2. – 2020. – С. 62-64. – EDN UPKNFL.
11. Stack Overflow Developer Survey 2025 // Stack Overflow. – URL: <https://survey.stackoverflow.co/2025> (дата обращения: 01.08.2025).
12. *Rai P.K., Singh P.* International Journal of Computer Science and Mobile Computing Studies and Analysis of Popular Database Models // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. – 2015. – Vol. 4, No. 5. – P. 834-838.
13. *Соколов К.К.* Сравнение реляционных и нереляционных моделей СУБД // Научное обеспечение технического и технологического прогресса. – 2019. – С. 39-41.
14. *Guo Q., Zhang C., Zhang S., Lu J.* Multi-model query languages: taming the variety of big data // Distributed and Parallel Databases. – 2023. – P. 1-41.
15. *Куприянич Е.М.* Сравнительный анализ подходов к разработке приложений NoSQL и SQL СУБД // XI Конгресс молодых ученых. – 2022. – С. 72-75.
16. *Pokorny J.* Graph databases: their power and limitations // Computer Information Systems and Industrial Management: Proc. of the 14th IFIP TC 8 International Conference, CISIM 2015, Warsaw, Poland, September 24-26, 2015. – Springer International Publishing, 2015. – P. 58-69.
17. *Шаринова Н.Н.* Об использовании NOSQL-хранилищ данных // Восточно-Европейский научный журнал. – 2016. – Т. 9, № 3. – С. 73-76. – EDN XRXLFF.
18. *Галигузова Е.В., Илларионова Ю.Е.* Сравнение реляционных и нереляционных СУБД // Символ науки. – 2023. – № 1-2. – С. 14-17.
19. Postmortem of service outage at 3.4M CCU // Fortnite: Official Website. – URL: <https://www.fortnite.com/news/postmortem-of-service-outage-at-3-4m-ccu> (дата обращения: 01.08.2025).
20. Базы данных в онлайн-играх. От Аллодов Онлайн до Skyforge // Блог компании VK. – URL: <https://habr.com/ru/companies/vk/articles/182088/> (дата обращения: 01.08.2025).
21. Making Our Backside Bigger // Eve Online: Official Website. – URL: <https://www.eveonline.com/news/view/making-our-backside-bigger> (дата обращения: 01.08.2025).

22. Котенко В.Н., Елисеев В.О. Инновационный метод хранения данных в играх в жанре Role-Playing Game // Донецкие чтения 2021: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. – 2021. – С. 243-246.
23. За чашкой кофе с разработчиками: классическая версия World of Warcraft // Официальный сайт компании Activision Blizzard. – URL: <https://news.blizzard.com/ru-ru/world-of-warcraft/21881587/za-chashkoj-kofe-s-razrabotchikami-klassicheskaya-versiya-world-of-warcraft> (дата обращения: 01.08.2025).
24. Abdullah Alqwbani B., Zuping Z., Aqlan F., Alqwbani A., Zuping Z., Aqlan F. Big Data Management for MMO Games and Integrated Website Implementation // Global Journals Inc. (USA). – 2014. – Vol. 14, No. 6. – Version 1.0.
25. MMORPG Data Storage (Part 1) // Plant Based Games. – URL: <https://plantbasedgames.io/blog/posts/01-mmorpg-data-storage-part-one/> (дата обращения: 01.08.2025).
26. Unity: The Gaming Industry in 2025 // GameDev Reports. – 2025. – URL: <https://gamedevreports.substack.com/p/unity-the-gaming-industry-in-2025> (дата обращения: 24.08.2025).
27. Newzoo Global Games Market Report 2024 // Newzoo. – URL: <https://newzoo.com/resources/trend-reports/newzoo-global-games-market-report-2024-free-version> (дата обращения: 24.08.2025).
28. DB-Engines Ranking // DB-Engines. – URL: <https://db-engines.com/en/ranking> (дата обращения: 01.08.2025).
29. Обзор мультимодельных баз данных // Big Data School. – 2023. – URL: <https://bigdataschool.ru/blog/multimodel-databases-overview/> (дата обращения: 24.08.2025).
30. NoSQL Performance Benchmark 2018 – MongoDB, PostgreSQL, OrientDB, Neo4j and ArangoDB // ArangoDB. – URL: <https://arangodb.com/2018/02/nosql-performance-benchmark-2018-mongodblog-postgresql-orientdb-neo4j-arangodb/> (дата обращения: 01.08.2025).
31. Ye F., Sheng X., Nedjah N., Sun J., Zhang P. A Benchmark for Performance Evaluation of a Multi-Model Database vs. Polyglot Persistence // Journal of Database Management. – 2023. – Vol. 34, No. 1. – P. 1-20.
32. TimeConqueror/gamedev-multimodal-dbms // GitHub. – URL: <https://github.com/TimeConqueror/gamedev-multimodal-dbms> (дата обращения: 01.08.2025).

REFERENCES

1. List'ev D.S., Savina A.G., Malyavkina L.I. Tendentsii razvitiya igrovoy industrii [Trends in the development of the gaming industry], *Tsifrovye instrumenty obespecheniya ustoychivogo razvitiya ekonomiki i obrazovaniya: novye podkhody i aktual'nye problem* [Digital tools for ensuring sustainable development of economy and education: new approaches and current problems]. 2022. pp. 69-75.
2. Kishkevich D.V., Nesterenkov S.N., Markov A.N. Primenenie tekhnologii Big Data v igrovoy industrii = Application of Big Data technology in the game industry [Application of Big Data technology in the game industry], *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA i analiz vysokogo urovnya: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 11–12 maya 2022 g. Belarus. gos. un-t informatiki i radioelektroniki* [BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA i analiz vysokogo urovnya: materials of the VIII International Scientific and Practical Conference, Minsk, May 11–12, 2022. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]; editorial board: V.A. Bogush [i dr.]. Minsk, 2022, pp. 120-124.
3. Khine P.P., Wang Z. A review of polyglot persistence in the big data world, *Information*, 2019, Vol. 10, No. 4, pp. 141.
4. Holubová I., Vavrek M., Scherzinger S. Evolution management in multi-model databases, *Data & Knowledge Engineering*, 2021, Vol. 136, Art. 101932.
5. Mihai (Rizescu) G. Multi-Model Database Systems: The State of Affairs, *Annals of Dunarea de Jos University of Galati. Fascicle I. Economics and Applied Informatics*, 2020, Vol. XXVI, pp. 211-215.
6. Lu J., Holubova I. Multi-model Databases: A New Journey to Handle the Variety of Data, *ACM Computing Surveys*, 2019, Vol. 52, No. 3, pp. 1-38.
7. Laputsenko A.V., Klochkova M.V. Osobennosti razlichnykh sistem upravleniya bazami dannykh [Features of various database management systems], *Potentsial rossiyskoy ekonomiki i innovatsionnye puti ego realizatsii* [Potential of the Russian economy and innovative ways of its implementation], 2022, pp. 337-342.
8. Jowan S.A., Faraj Swese R., Yousef Aldabrzi A., Saad Shertil M. Traditional RDBMS to NoSQL Database: New Era of databases for Big Data, *Journal of Humanities and Applied Science*, 2016, Vol. 29.
9. Alekseev A.M., Borozna V.S., Suruzhiy N.A. Sistemy upravleniya bazami dannykh. Klassifikatsiya sistem upravleniya bazami dannykh [Database management systems. Classification of database management systems], 2023.

10. Karpyuk A.D., Vlasenkova D.G. Kakie vidy SUBD i ikh realizatsii sushchestvuet i chto podkhodit luchshim obrazom dlya razrabotki avtomatizirovannykh informatsionnykh sistem? [What types of DBMS and their implementations exist and what is best suited for the development of automated information systems?], *Prioritetnye napravleniya innovatsionnoy deyatel'nosti v promyshlennosti: sb. nauch. st. po itogam Chetvertoy mezhdunar. nauch. konf., Kazan', 29–30 aprelya 2020 goda* [Priority directions of innovative activity in industry: collection of scientific articles on the results of the Fourth International Scientific Conference, Kazan, April 29–30, 2020]. In 2 parts. Part 2, 2020, pp. 62-64. EDN UPKNFL.
11. Stack Overflow Developer Survey 2025, *Stack Overflow*. Available at: <https://survey.stackoverflow.co/2025> (accessed 01 August 2025).
12. Rai P.K., Singh P. International Journal of Computer Science and Mobile Computing Studies and Analysis of Popular Database Models, *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2015, Vol. 4, No. 5, pp. 834-838.
13. Sokolov K.K. Sravnenie relyatsionnykh i nerelyatsionnykh modeley SUBD [Comparison of relational and non-relational DBMS models], *Nauchnoe obespechenie tekhnicheskogo i tekhnologicheskogo progressa* [Scientific support of technical and technological progress], 2019, pp. 39-41.
14. Guo Q., Zhang C., Zhang S., Lu J. Multi-model query languages: taming the variety of big data, *Distributed and Parallel Databases*, 2023, pp. 1-41.
15. Kupriyanchik E.M. Sravnitel'nyy analiz podkhodov k razrabotke prilozheniy NoSQL i SQL SUBD [Comparative analysis of approaches to application development for NoSQL and SQL DBMS], *XI Kongress molodykh uchenykh* [XI Congress of Young Scientists], 2022, pp. 72-75.
16. Pokorný J. Graph databases: their power and limitations, *Computer Information Systems and Industrial Management: Proc. of the 14th IFIP TC 8 International Conference, CISIM 2015, Warsaw, Poland, September 24-26, 2015*. Springer International Publishing, 2015, pp. 58-69.
17. Sharipova N.N. Ob ispol'zovanii NOSQL-khranilishch dannykh [On the use of NoSQL data storages], *Vostochno-Evropeyskiy nauchnyy zhurnal* [East-European Scientific Journal], 2016, Vol. 9, No. 3, pp. 73-76. EDN XRXLFF.
18. Galiguzova E.V., Illarionova Yu.E. Sravnenie relyatsionnykh i nerelyatsionnykh SUBD [Comparison of relational and non-relational DBMS], *Simvol nauki* [Symbol of Science], 2023, No. 1-2, pp. 14-17.
19. Postmortem of service outage at 3.4M CCU, *Fortnite: Official Website*. Available at: <https://www.fortnite.com/news/postmortem-of-service-outage-at-3-4m-ccu> (accessed 01 August 2025).
20. Bazy dannykh v onlayn-igrakh. Ot Allodov Onlayn do Skyforge [Databases in online games. From Allods Online to Skyforge], *Blog kompanii VK* [VK Company Blog]. Available at: <https://habr.com/ru/companies/vk/articles/182088/> (accessed 01 August 2025).
21. Making Our Backside Bigger [Making Our Backside Bigger], *Eve Online: Official Website* [Eve Online: Official Website]. Available at: <https://www.eveonline.com/news/view/making-our-backside-bigger> (accessed 01 August 2025).
22. Kotenko V.N., Eliseev V.O. Innovatsionnyy metod khraneniya dannykh v igrakh v zhanre Role-Playing Game [Innovative method of data storage in Role-Playing Games], *Donetskie chteniya 2021: obrazovanie, nauka, innovatsii, kul'tura i vyzovy sovremenosti* [Donetsk readings 2021: education, science, innovation, culture and challenges of our time], 2021, pp. 243-246.
23. Za chashkoy kofe s razrabotchikami: klassicheskaya versiya World of Warcraft [Over a cup of coffee with the developers: the classic version of World of Warcraft], *Ofitsial'nyy sayt kompanii Activision Blizzard* [Official website of Activision Blizzard company]. Available at: <https://news.blizzard.com/ru-ru/world-of-warcraft/21881587/za-chashkoj-kofe-s-razrabotchikami-klassicheskaya-versiya-world-of-warcraft> (accessed 01 August 2025).
24. Abdullah Alqwbani B., Zuping Z., Aqlan F., Alqwbani A., Zuping Z., Aqlan F. Big Data Management for MMO Games and Integrated Website Implementation, *Global Journals Inc. (USA)*, 2014, Vol. 14, No. 6, Version 1.0.
25. MMORPG Data Storage (Part 1), *Plant Based Games*. Available at: <https://plantbasedgames.io/blog/posts/01-mmorpg-data-storage-part-one/> (accessed 01 August 2025).
26. Unity: The Gaming Industry in 2025, *GameDev Reports*, 2025. Available at: <https://gamedevreports.substack.com/p/unity-the-gaming-industry-in-2025> (accessed 01 August 2025).
27. Newzoo Global Games Market Report 2024, *Newzoo*. Available at: <https://newzoo.com/resources/trend-reports/newzoo-global-games-market-report-2024-free-version> (accessed 24 August 2025).
28. DB-Engines Ranking, *DB-Engines*. Available at: <https://db-engines.com/en/ranking> (accessed 01 August 2025).
29. Obzor mul'timodel'nykh baz dannykh [Overview of multi-model databases], *Big Data School*, 2023. Available at: <https://bigdataschool.ru/blog/multimodel-databases-overview/> (accessed 24 August 2025).

30. NoSQL Performance Benchmark 2018 – MongoDB, PostgreSQL, OrientDB, Neo4j and ArangoDB // ArangoDB. Available at: <https://arangodb.com/2018/02/nosql-performance-benchmark-2018-mongodb-postgresql-orientdb-neo4j-arangodb/> (accessed 01 August 2025).
31. Ye F., Sheng X., Nedjah N., Sun J., Zhang P. A Benchmark for Performance Evaluation of a Multi-Model Database vs. Polyglot Persistence, *Journal of Database Management*, 2023, Vol. 34, No. 1, pp. 1-20.
32. TimeConqueror/gamedev-multimodal-dbms, *GitHub*. Available at: <https://github.com/TimeConqueror/gamedev-multimodal-dbms> (accessed 01 August 2025).

Коблов Андрей Александрович – ООО "Коммуникационная платформа"; e-mail: timeconqueror999@gmail.com; г. Москва, Россия; программист-разработчик; ORCID: 0009-0007-0075-1794.

Ромакина Оксана Михайловна – Национальный исследовательский университет ИТМО; e-mail: omromakina@itmo.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; к.ф.-м.н.; доцент факультета Прикладной информатики; ORCID: 0000-0001-9468-4404.

Клемешева Анастасия Сергеевна – Национальный исследовательский университет ИТМО; e-mail: primell@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; магистрант факультета Прикладной информатики; ORCID: 0009-0008-1259-8886.

Арсеньева Анна Закировна – Национальный исследовательский университет ИТМО; e-mail: anna.z.arseneva@itmo.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; старший преподаватель факультета Прикладной информатики; ORCID: 0000-0002-2606-1667.

Koblov Andrey Alexandrovich – ООО "Communication Platform"; e-mail: timeconqueror999@gmail.com; Moscow, Russia; programmer-developer; ORCID: 0009-0007-0075-1794.

Romakina Oksana Mikhaylovna – ITMO University; e-mail: omromakina@itmo.ru; St. Petersburg, Russia; cand. of phys. and math. sc.; associate professor of the Faculty of Applied Informatics; ORCID: 0000-0001-9468-4404.

Klemesheva Anastasiia Sergeevna – ITMO University; e-mail: primell@mail.ru; St. Petersburg, Russia; master student of the Faculty of Applied Informatics; ORCID: 0009-0008-1259-8886.

Arseneva Anna Zakirovna – ITMO University; e-mail: anna.z.arseneva@itmo.ru; St. Petersburg, Russia; senior tutor of the Faculty of Applied Informatics; ORCID: 0000-0002-2606-1667.

УДК 004.382.2

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-121-136

А.К. Мельников

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОННЫХ И КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ЗНАЧЕНИЙ СТАТИСТИК КОНЕЧНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Проведено исследование возможности применения фотонных и квантовых вычислительных технологий для расчета точных распределений вероятностей значений статистик дискретных последовательностей в предположении о наличии работающих технических образцов вычислительных систем и создания требуемых квантовых алгоритмов. Оценка производительности вычислительных систем на базе фотонных вычислительных технологий базируется на материалах ИЦФМ РАН г. Саров. Оценка производительности квантовой вычислительной системы проведена методом сравнения времени решения задачи отбора проб бозонов из заданного распределения на вычислительной системе с известной производительностью и времени её выполнения на квантовой вычислительной системе. Для оценки возможности применения фотонных и квантовых вычислительных технологий к расчету точных распределений рассмотрены современные методы их вычисления, основанные на решении уравнения кратности типов и системы линейных уравнений в неотрицательных целых числах. Приводятся аналитические выражения, определяющие вычислительную сложность этих методов. Проведено определения значений границ параметров точных распределений доступных для вычисления с помощью применения фотонных и квантовых вычислительных технологий. Приводится сравнение полученных результатов с результатами примене-

ния многопроцессорных вычислительных технологий для расчета точных распределений различными методами. Проведен анализ возможностей применения фотонных и квантовых вычислительных технологий для расчета точных распределений методом сравнения количества пар параметров возможных к расчету точных распределений с общим числом параметров распределений, входящих в область Р. Фишера, определяющую пятикратное превосходство объема выборки над мощностью алфавита. Анализ данных о числе параметров выборок показывает, что при увеличении производительности используемых вычислительных технологий происходит рост возможностей по расчету точных распределений, но даже при использовании самых производительных из них квантовых технологий он не превосходит десятой доли от общего количества точных распределений, необходимых для расчета при проведении статистического анализа дискретных последовательностей в алфавитах мощности до 256 знаков.

Вероятность; статистика; распределение; вычислительный ресурс; производительность; вычислительная технология; многопроцессорная; фотонная; квантовая.

A.K. Melnikov

STUDY OF POSSIBILITIES OF USING PHOTONIC AND QUANTUM COMPUTING TECHNOLOGIES TO CALCULATE EXACT PROBABILITY DISTRIBUTIONS OF STATISTIC VALUES FROM FINITE DISCRETE SEQUENCES

This article explores the feasibility of using photonic and quantum computing technologies to calculate exact probability distributions of discrete sequence statistics, assuming the existence of working hardware prototypes of computing systems and the development of the required quantum algorithms. The performance evaluation of computing systems based on photonic computing technologies is based on materials from the Sarov Scientific Center for Physics and Microphysics of the Russian Academy of Sciences. The performance of a quantum computing system is assessed by comparing the time it takes to solve a boson sampling problem from a given distribution on a computing system with known performance and the time it takes to solve it on a quantum computing system. To assess the feasibility of using photonic and quantum computing technologies to calculate exact distributions, modern methods for calculating them are considered. These methods are based on solving the type multiplicity equation and a system of linear equations in non-negative integers. Analytical expressions determining the computational complexity of these methods are presented. The values of the boundaries of the parameters of exact distributions accessible for calculation using photonic and quantum computing technologies are determined. A comparison of the obtained results with the results of using multiprocessor computing technologies to calculate exact distributions using various methods is presented. An analysis of the feasibility of using photonic and quantum computing technologies to calculate exact distributions is conducted by comparing the number of parameter pairs that can be calculated for exact distributions with the total number of distribution parameters within the Fisher region, which determines a fivefold increase in sample size over the alphabet size. An analysis of the data on the number of sample parameters shows that with increasing performance of the computing technologies used, the ability to calculate exact distributions increases. However, even with the most powerful quantum technologies, this number does not exceed one-tenth of the total number of exact distributions required for statistical analysis of discrete sequences in alphabets up to 256 characters long.

Probability; statistics, distribution; computing resource; performance; computing technology; multiprocessor; photonic; quantum.

Введение. На современном этапе одними из стремительно развивающихся областей перспективных вычислительных технологий являются фотонные и квантовые технологии обработки информации. Анонсируемая разработчиками производительность вычислительных систем на базе этих перспективных технологий, по словам производителей, может позволить решить большую часть вычислительно-трудоемких задач, стоящих в области обработки информации. Наряду с технологиями искусственного интеллекта (ИИ), позволяющими решать множество задач по обработке информации [1], актуальными в этой области остаются задачи, решаемые с помощью статистических методов [2], используя критерии согласия. Для обоснованного применения критериев согласия при решении задачи принадлежности дискретной последовательности к некоторому классу последовательностей, определяемому их статистическими характеристиками, например, к равновероятному, необходимо знать точное распределение вероятностей значений статистики (далее точное распределение). Расчет точных распределений является вычислительно-трудоемкой задачей, требующей использования максимального вычислительного

ресурса [3, 4]. С бурным развитием фотонных и квантовых вычислительных технологий, выражающихся в создании технических образцов и разработке алгоритмов, требуется исследовать вопрос о том, насколько их применение сможет решить проблему расчета точных распределений.

Постановка задачи и цели исследования. Рассмотрим случайную величину (с.в.) ξ , принимающую значения на дискретном множестве исходов $A_N = \{a_1, \dots, a_N\}$ мощности N с вероятностями $\{p_1, \dots, p_N \mid P(\xi^{(v)} = a_i) = p_i\}$. Под дискретной последовательностью (последовательностью) $T_{N,n} = \{t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_n}\}$ длины n в алфавите A_N мощности N понимается результат n независимых испытаний с.в. ξ : $\{\xi^{(1)}, \xi^{(2)}, \dots, \xi^{(n)}\}$, таких что $(t_v = \xi^{(v)} \mid P\{t_v = a_i\} = p_i, \text{ для } v = \overline{1, n}, i = \overline{1, N})$.

Совокупность всех возможных различных последовательностей (выборок) длины n в алфавите A_N образует полное множество элементарных событий $\{\overline{T_{N,n}} \mid T_{N,n}^{(i)} \in T_{N,n}\}$, где $|\overline{T_{N,n}}| = N^n$. Тогда под точным распределением вероятности значений некоторой статистики $\{S_{N,n} : V^{(N)} \rightarrow D\} = P_T\{S_{N,n} \geq x\}$, далее просто точное распределение, будем понимать последовательность значений вероятностей $(P_T\{S_{N,n} \geq 1\}, P_T\{S_{N,n} \geq 2\}, \dots, P_T\{S_{N,n} \geq c\})$, где значение $c \approx 100$ и

$$P_T\{S_{N,n} \geq x\} = \sum_{T_{N,n}^{(i)} \in \overline{T_{N,n}}} I(S_{N,n}(T_{N,n}^{(i)}) \geq x) \cdot P(T_{N,n}^{(i)} \in \overline{T_{N,n}}),$$

а

$$I(S_{N,n}(T_{N,n}^{(i)}) \geq x) = \begin{cases} 0, & \text{если } S_{N,n}(T_{N,n}^{(i)}) < x. \\ 1, & \text{если } S_{N,n}(T_{N,n}^{(i)}) \geq x \end{cases}$$

Так как по своему построению точные распределения содержат полную информацию о возможных значениях статистики, что и определяет их преимущественное применение при построении процедур статистического обработки последовательностей, то требуется знать, для каких параметров выборок они могут быть рассчитаны. Отсюда вытекает цель статьи.

Целью данной статьи является определение возможностей применения перспективных фотонных и квантовых вычислительных технологий для расчета точных распределения $P_T\{S_{N,n} \geq x\}$, определение максимальных значений параметров выборки N и n , для которых могут быть проведены данные расчеты и сравнение их со значениями параметров, которые могут быть получены при применении современных многопроцессорных вычислительных систем.

Оценка производительности вычислительных систем на базе фотонных и квантовых вычислительных технологий. Предварительно отметим, что производительность классической многопроцессорной вычислительной системы (МВС) – P_{MBC} , основанной либо на универсальных процессорах, либо на видеокартах, либо на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), а скорей всего на их композиции, оценим как 10^{18} операций в секунду, опираясь на данные из TOP500, где на первом месте МВС HPE Cray EX255a с пиковой производительностью $1,742 \times 10^{18}$ оп./сек., а на втором месте Frontier HPE Cray EX с пиковой производительностью $1,353 \times 10^{18}$ оп./сек. [5]. Таким образом, оцениваем производительность МВС в

$$P_{MBC} = 10^{18} \tag{1}$$

операций в секунду.

Теперь оценим производительность, вычислительной системы на базе фотонных вычислительных технологий. В Национальном центре физики и математики (НЦФМ) г. Саров под руководством научного руководителя НЦФМ академика РАН Александра

Михайловича Сергеева ведутся работы по созданию универсальной гибридной электронно-фотонной вычислительной системе (УГЭФВС) производительностью 10^{19} операций в секунду [6, 7]. На текущий момент работающего прототипа УГЭФВС не существует из-за трудностей в разработке фотонного триггера, являющегося основой логических элементов фотонного процессора и фотонной памяти, хотя теоретические проблемы его создания, по словам разработчиков, успешно разрешены. Но, принимая гипотезу о наличии работающего образца УГЭФВС, производительность $P_{УГЭФВС}$ оцениваем, как

$$P_{УГЭФВС} = 10^{19} \quad (2)$$

операций в секунду.

Теперь попытаемся оценить производительность квантовой вычислительной системы, основанной на квантовой неопределенности (суперпозиции), позволяющей кубиту находиться одновременно в нескольких состояниях, и квантовой запутанности (связности), позволяющей связанным кубитам дублировать изменения состояния одного из них. Оценку производительности квантовой вычислительной системы произведем методом сравнения времени выполнения одинаковой задачи на вычислителе с известной производительностью и времени её выполнения на квантовой системе, как это было предложено д.ф.-м.н., действительным членом Академии криптографии РФ Алиевым Ф.К. и группой авторов в [8].

Оценка производительности гибрида классической и квантовой вычислительной систем (ГККВС) будем проводить, основываясь на тезисе о том, что классическому японскому суперкомпьютеру «Фугаку» (ЯСКФ) [9], имеющему производительность 442 петафлопс ($442 \cdot 10^{15}$ оп./сек.) с числами с плавающей запятой, потребуется 2,5 млрд лет для достижения результата по решению задачи отбора проб из известного распределения (реализация процесса *Boson Sampling*), определяемого уравнением

$$h_1^{(v)} + h_2^{(v)} + \dots + h_N^{(v)} = n, \quad (3)$$

тогда как данный результат может быть получен на ГККВС, например, «Цзючжан (Jiuzhang)», «Цзючжан-2», «Цзючжан-3» [10–12], за 200 секунд. Необходимо отметить, что эти компьютеры относятся к классу так называемых квантовых симуляторов – вариантов квантовых вычислителей, решающих одну задачу или узкий класс задач.

Таким образом вычислительный ресурс ВР, предоставляемый ЯСКФ – $ВР_{ЯСКФ}$, равен произведению производительности ЯСКФ – $P_{ЯСКФ}$ на время его использования $t_{ЯСКФ}$. Тогда, учитывая, что в 1 год $\approx 31\,536\,000$ секунд

$$ВР_{ЯСКФ} = P_{ЯСКФ} \times t_{ЯСКФ} = 442 \cdot 10^{15} \times 2,5 \cdot 10^9 \times 31,536 \cdot 10^6 \approx 34,85 \cdot 10^{33}. \quad (4)$$

Но согласно принятому основному тезису, такой же вычислительный ресурс (4) предоставляет ГККВС за 200 секунд

$$ВР_{ГККВС} = P_{ГККВС} \times t_{ГККВС} = P_{ГККВС} \times 200. \quad (5)$$

Тогда, приравняв выражения (4) и (5), оцениваем производительность ГККВС как

$$P_{ГККВС} = \frac{ВР_{ЯСКФ}}{200} = \frac{34,85 \cdot 10^{33}}{2 \cdot 10^2} \approx 1,7 \cdot 10^{32}. \quad (6)$$

операций с плавающей запятой в секунду.

Области применения точных и предельных распределений. Для решения статистических задач по разделению гипотез о принадлежности последовательностей к равновероятному распределению необходимо уметь вычислять точные распределения в тех областях параметров последовательностей, в которых не применимы предельные распределения. Например Р.А. Фишер (*R.A. Fisher*) в [13] рекомендует ограничение k , основанное на отношении объема выборки n к мощности алфавита N : $k = n/N$ и предлагает применять предельные распределения при $k \geq 5$. Таким образом предельные распределения предлагается использовать для анализа последовательностей с параметрами N и n , для которых

$$F = \{(N, n) \mid \text{для каждого } N = 2, 3, \dots; n = 5N, 5N + 1, 5N + 2 \dots\}, \quad (7)$$

назовем эту область областью предельных распределений или областью Фишера и обозначим через F . На рис. 1 область Фишера (область 1), для которой нет прямой необходимости вычислять точные распределения так как можно применять предельные, представляет собой площадь, ограниченную снизу прямой, реализующей линейную функцию $y=5 \cdot x$ рис. 1.



Рис. 1. Области параметров выборки применения предельных (1) и точных (2) распределений

Количество пар параметров выборки (N, n) в области, ограниченной сверху прямой по предположению Р. Фишера ($n = 5 \cdot N$) [13: 73], в которой не применимы предельные распределения, при ограничении мощности алфавита 256 знаками ($N = 2, 3, \dots, 256$) равно

$$|\{(N, n) : N = 2, 3, \dots, 256; n \leq 5 \cdot N\}| = \sum_{i=2}^{256} 5 \cdot i = 164475 \quad (8)$$

и частично показано на рис. 1. Область 1 – это область параметров последовательностей, для анализа которых могут быть применены предельные распределения, а область 2 – назовем её областью необходимого расчета распределений, так как в ней необходимо пользоваться точными распределениями, которые предварительно должны быть вычислены [14].

Методы расчета точных распределений. Необходимо отметить большой вклад в разработку методов расчета точных распределений внесенный в Математическом институте им. В.А. Стеклова РАН г. Москва работами под руководством д.ф.м.н., действительного члена Академии криптографии РФ **Андрея Михайловича Зубкова** [15–18].

Теперь из существующих методов расчета точных распределений рассмотрим два основных метода.

Первый метод – это метод первой кратности (МПК) [19], основанный на решении уравнения кратности типов (уравнения первой кратности)

$$h_1 + h_2 + \dots + h_N = n, \quad (9)$$

где $\{h_i \mid i = \overline{1:N}\}$ есть частота встречаемости знака a_i алфавита последовательности $A_N = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ мощности N в последовательности длины n . Вычислительная сложность расчета точного распределения методом МПК – $C_{МПК}(P_T\{S_{N,n} \geq x\})$ определяется аналитическим выражением из [19]

$$C_{МПК}(P_T\{S_{N,n} \geq x\}) = (n+1)^N \cdot 3N + C_{N+n-1}^N \cdot (8N + n + 2 \log_2 C_{N+n-1}^N + 5), \quad (10)$$

Второй метод – это метод основанный на решении систем линейных уравнения (СЛУ) вида

$$\begin{cases} \mu_0^{(v)} + \mu_1^{(v)} + \dots + \mu_n^{(v)} = N \\ 1 \cdot \mu_1^{(v)} + 2 \cdot \mu_2^{(v)} + \dots + n \cdot \mu_n^{(v)} = n \end{cases}, \quad (11)$$

где $\mu_j^{(v)}$ есть число значений $h_i^{(v)}$ из уравнения (9), равных j . Так как вектор $\{\mu_0^{(v)}, \mu_1^{(v)}, \dots, \mu_n^{(v)}\}$ называют вектором второй маркировки или второй кратности то метод основанный на решении СЛУ (11) называют методом второй кратности (МВК). Его вычислительная сложность $C_{МВК}(P_T\{S_{N,n} \geq x\})$ определяется следующим выражением [20],

$$C_{МВК}(P_T\{S_{N,n} \geq x\}) \leq P_{L_{\mu(N,n)}} \times 5n + K_{\mu}(N,n) \cdot (5 \cdot (n+1) + 2(N+n) + 3) + 2 \times K_{\mu}(N,n) \cdot \log_2 K_{\mu}(N,n) + 2 \cdot K_{\mu}(N,n), \tag{12}$$

где $P_{L_{\mu(N,n)}}$ – ограничение на количество опробуемых векторов возможных решений СЛУ (11), а $K_{\mu}(N,n)$ – число её неотрицательных целочисленных решений, которые вычислены в [21].

Определения значений границ параметров точных распределений доступных для вычисления. Для определения параметров точных распределений $P_T\{S_{N,n} \geq x\}$ – мощности алфавита N и объема выборки (длины последовательности) n , для которых они могут быть вычислены введем несколько предположений:

1. о наличии работающего прототипа фотонной вычислительной системы (УГЭФВС) с производительностью 10^{19} оп./сек.;
2. о наличии квантовой вычислительной системы (ГККВС) с требуем количеством кубит [20] производительностью $1,7 \cdot 10^{32}$ оп./сек.;
3. о наличии квантового алгоритма решения линейного уравнения кратности типов вида (9) [8], используемого для вычисления точных распределений методом первой кратности МПК;
4. о наличии квантового алгоритма решения системы линейных уравнений второй кратности вида (11), используемого для вычисления точных распределений методом второй кратности (МВК).

Теперь определим значение вычислительного ресурса (количество операций) $BP_{BT}(t)$, предоставляемого вычислительными системами на базе рассматриваемых вычислительных технологий $BT = \{МВС, УГЭФВС, ГККВС\}$ в течении периода использования t , равного 1 (одному) месяцу ($2\ 592\ 000$ секунд) $t = 2\ 592\ 000$ сек. Вычислительный ресурс $BP_{BT}(t)$ равен произведению производительности $BT - P_{BT}$ на величину периода времени t

$$BP_{BT}(t) = P_{BT} \times t, \tag{13}$$

значения для многопроцессорных (МВС), фотонных (УГЭФВС) и квантовых (ГККВС) вычислительных технологий приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения вычислительного ресурса, предоставляемого вычислительными технологиями за 1 месяц

	Вычислительные технологии BT		
	Многопроцессорные МВС	Фотонные УГЭФВС	Квантовые ГККВС
Производительность (операций в секунду)	10^{18}	10^{19}	$1,7 \cdot 10^{32}$
Вычислительный ресурс BP_{BT} за 1 месяц (число операций)	$2,592 \cdot 10^{24}$	$2,592 \cdot 10^{25}$	$4,406 \cdot 10^{38}$

Множество параметров N и n точных распределений $P_T \{S_{N,n} \geq x\}$, которые могут быть вычислены некоторым методом M при использовании вычислительной системы на базе вычислительной технологии BT определяются из соотношения

$$C_M(P_T \{S_{N,n} \geq c\}) \leq BP_{BT}, \quad (14)$$

где $C_M(P_T \{S_{N,n} \geq c\}) \leq BP_{BT}$ – вычислительная сложность (число операций), которое необходимо произвести для вычисления точного распределения $P_T \{S_{N,n} \geq x\}$ с параметрами N и n при применении метода M . Поэтому определим максимальные значения параметров N и n , для которых эти вычисления возможны. Для этого для каждого значения мощности алфавита N от 2 до 32768 вычислим максимальное значение $n - n(N)$, для которого вычислительная сложность метода $M - C_M(P_T \{S_{N,n} \geq x\})$ не превышает вычислительного ресурса $BP - BP_{BT}$, предоставленного вычислительной технологией BT . Таким образом максимальные значения параметров распределений N и $n - \text{Max}(N, n)_{(M, BT)}$

$$\text{Max}(N, n)_{(M, BT)} = \{ (2, \text{max } n(2)), (3, \text{max } n(3)), \dots, (256, \text{max } n(256)) \}, \quad (15)$$

где

$$\text{max } n(j) = \max_i \{ i \mid \text{пока } C_M(P_T \{S_{j,i} \geq x\}) \leq BP_{BT} \}. \quad (16)$$

Были проведены вычисления максимальных значения параметров распределений N и $n - \text{Max}(N, n)_{(M, BT)}$, которые могут быть рассчитаны методами $M = \{\text{МПК}, \text{МБК}\}$ при применении вычислительных технологий $BT = \{\text{МВС}, \text{УГЭФВС}, \text{ГККВС}\}$. Результаты вычислений сведены в табл. 2 и проиллюстрированы на рис. 2. Для минимизации табл. 2 строки, повторяющиеся в столбцах 1–6, не приводятся.

Таблица 2

Максимальные значения параметров распределений

Мощность алфавита N	Длина последовательностей (объём выборки) n						Максимум по Р. Фишеру ($n=5 \cdot N$)
	МПК МВС 10^{18}	МПК Фотон 10^{19}	МПК Квант $1,7 \times 10^{32}$	МБК МВС 10^{18}	МБК Фотон 10^{19}	МБК Квант $1,7 \times 10^{32}$	
	1	2	3	4	5	6	7
2	>130	>170	>450	37	39	61	10
3	>130	>170	>450	37	39	60	15
4	>130	>170	>450	37	38	60	20
5	>130	>170	>450	37	38	60	25
6	>130	>170	>450	37	38	60	30
7	>130	>170	>450	37	38	60	35
8	>130	>170	>450	36	38	60	40
9	>130	>170	>450	36	38	60	45
10	>130	>161	>450	36	38	60	50
11	119	146	>450	36	38	60	55
12	79	96	>450	36	38	60	60
13	55	66	>450	36	38	60	65
14	41	49	435	36	38	60	70
15	31	37	249	36	38	59	75
16	25	29	190	36	38	59	80
17	20	23	151	36	38	59	85
18	17	19	111	36	38	59	90
19	14	16	86	36	37	59	95
20	12	14	68	36	37	59	100
21	10	12	55	36	37	59	105

22	9	10	46	36	37	59	110
23	8	9	38	36	37	59	115
24	7	8	33	36	37	59	120
25	6	7	28	36	37	59	125
26	6	7	24	36	37	59	130
27	5	6	21	36	37	59	135
28	5	5	19	36	37	59	140
29	4	5	17	36	37	59	145
30	4	5	15	36	37	59	150
31	4	4	14	36	37	59	155
32	4	4	12	35	37	59	160
33	3	4	11	35	37	59	165
34	3	3	10	35	37	59	170
35	3	3	10	35	37	59	175
36	3	3	9	35	37	59	180
37	2	3	8	35	37	59	185
38	2	3	8	35	37	59	190
39	2	2	7	35	37	59	195
40	2	2	7	35	37	59	200
41	2	2	6	35	37	59	205
43	2	2	6	35	37	59	215
44	2	2	5	35	37	59	220
46	2	2	5	35	37	59	230
47	1	2	4	35	37	59	235
48	1	2	4	35	37	59	240
49	1	1	4	35	37	59	245
52	1	1	4	35	37	59	260
53	1	1	3	35	37	59	265
59	1	1	3	35	37	59	295
60	1	1	2	35	37	59	300
61	1	1	2	35	37	58	305
73	1	1	2	35	37	58	365
74	0	1	2	35	37	58	370
75		1	2	35	37	58	375
76		0	2	35	37	58	380
77		0	1	35	37	58	385
79			1	35	37	58	395
80			1	35	36	58	400
117			1	35	36	58	585
118			0	35	36	58	590
131				35	36	58	655
132				34	36	58	660
248				34	36	58	1240
249				34	36	57	1245
256				34	36	57	1280

Значения в колонках 1–6 отражены на рис. 2 в областях 1–6, при этом значения для длин последовательности n , превышающих соответствующие значения в колонке 8 ($5 \cdot N$), позволяющие применять предельные распределения не отображаются. Области значений пар параметров показаны с перекрытием таким образом, что область 1 представлена полностью, а следующие области от 2 до 8 включают в себя все предыдущие и изображены только приращением относительно предыдущей области.

Анализ возможностей применения вычислительных технологий для расчета точных распределений. Для сравнения возможностей применения вычислительных технологий для расчета точных распределений (ТР), вначале, определим соотношение количества пар параметров ТР, для которых они могут быть рассчитаны методами $M = \{МПК, МВК\}$ при

применении вычислительных технологий $BT = \{MBC, УГЭФВС, ГККВС\} - TP(M, BT)$, принимая за 100% количество пар параметров (N, n) из области 7 необходимого расчета TP при $\{N = 2:256, n = 1:5N\}$, которое равно

$$|\{(N, n) : N = 2, 3, \dots, 256; n \leq 5 \cdot N\}| = \sum_{i=2}^{256} 5 \cdot i = 164475 \cdot \quad (17)$$

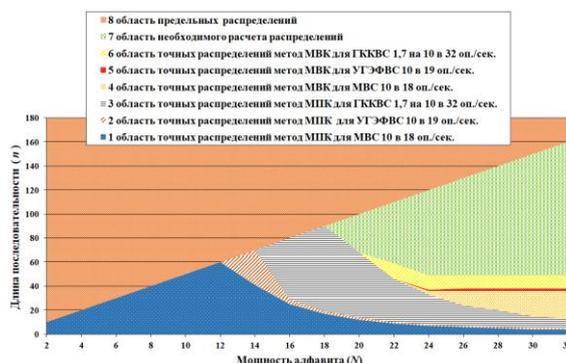


Рис. 2. Области параметров выборок, доступных для расчета точных распределений для различных вычислительных технологий различными методами расчетов

Теперь определим значения количества пар параметров, для которых могут быть вычислены TP для всех M и BT

$$\{TP(M, BT) | M = \{МПК, MBK\}; BT = \{MBC, УГЭФВС, ГККВС\}\}.$$

При этом всегда будем учитывать, что если $n(N) \geq 5 \cdot N$, то значение $n(N)$ принимается равным $5 \cdot N - n(N) = 5 \cdot N$. Это принято потому, что возможность расчета TP для каждого такого случая (N, n) не имеет необходимости, так как можно пользоваться известными предельными распределениями [22: 610]. Для каждого такого случая данная ситуация подсвечена в табл. 2.

Рассмотрим применение для расчета TP метода МПК, основанного на решении уравнения кратности типов (9).

Методом МПК с использованием вычислительного ресурса MBC – многопроцессорные технологии, за один месяц $BP_{MBC} = 2,592 \times 10^{24}$ (табл. 1) могут быть вычислены TP из области параметров мощности

$$TP(МПК, MBC) = \sum_{N=2}^{12} 5 \cdot N + \sum_{N=13}^{256} \max n(N, BP_{MBC} = 2,592 \cdot 10^{24})$$

и учитывая, что для алфавита мощности N более 73 TP вычислено при данном ограничении BP_{MBC} быть не может, то

$$TP(МПК, MBC) = \sum_{N=2}^{12} 5 \cdot N + \sum_{N=13}^{73} \max n(N, BP_{MBC} = 2,592 \cdot 10^{24}) = 731' \quad (18)$$

что составляет 0,44% от общего числа необходимых для расчета TP (17).

При использовании вычислительного ресурса УГЭФВС – фотонные технологии, за один месяц $BP_{УГЭФВС} = 2,592 \cdot 10^{25}$ (табл. 1) могут быть вычислены TP из области параметров мощности

$$TP(МПК, УГЭФВС) = \sum_{N=2}^{13} 5 \cdot N + \sum_{N=14}^{256} \max n(N, BP_{УГЭФВС} = 2,592 \cdot 10^{25})$$

и учитывая, что для алфавита мощности N более 75 TP вычислено при данном ограничении $BP_{УГЭФВС}$ быть не может, то

$$TP(МПК, УГЭФВС) = \sum_{N=2}^{13} 5 \cdot N + \sum_{N=14}^{75} \max n(N, BP_{УГЭФВС} = 2,592 \cdot 10^{25}) = 786' \quad (19)$$

что составляет 0,48% от общего числа необходимых для расчета TP (17).

При использовании вычислительного ресурса ГККВС – квантовые технологии, за один месяц $BP_{ГККВС} = 4,406 \cdot 10^{38}$ (табл. 1) могут быть вычислены ТР из области параметров мощности

$$TP(МПК, ГККВС) = \sum_{N=2}^{18} 5 \cdot N + \sum_{N=19}^{256} \max n(N, BP_{ГККВС} = 4,406 \cdot 10^{38})$$

и учитывая, что для алфавита мощности N более 117 ТР вычислено при данном ограничении $BP_{ГККВС}$ быть не может, то

$$TP(МПК, ГККВС) = \sum_{N=2}^{18} 5 \cdot N + \sum_{N=19}^{119} \max n(N, BP_{ГККВС} = 4,406 \cdot 10^{38}) = 1549, \quad (20)$$

что составляет 0,94% от общего числа необходимых для расчета ТР (17).

Теперь рассмотрим применение для расчета ТР метода МВК, основанного на решении систем линейных уравнений (11).

Методом МВК с использованием вычислительного ресурса МВС – многопроцессорные технологии, за один месяц $BP_{МВС} = 2,592 \cdot 10^{24}$ (табл. 1) могут быть вычислены ТР из области параметров мощности

$$TP(МВК, МВС) = \sum_{N=2}^7 5 \cdot N + \sum_{N=8}^{256} \max n(N, BP_{МВС} = 2,592 \cdot 10^{24}) = 8749, \quad (21)$$

что составляет 5,32% от общего числа необходимых для расчета ТР (17).

При использовании вычислительного ресурса УГЭФВС – фотонные технологии, за один месяц $BP_{УГЭФВС} = 2,592 \cdot 10^{25}$ (табл. 1) методом МВК могут быть вычислены ТР из области параметров мощности

$$TP(МВК, УГЭФВС) = \sum_{N=2}^7 5 \cdot N + \sum_{N=8}^{256} \max n(N, BP_{УГЭФВС} = 2,592 \cdot 10^{25}) = 9182, \quad (22)$$

что составляет 5,58% от общего числа необходимых для расчета ТР (17).

При использовании вычислительного ресурса ГККВС – квантовые технологии, за один месяц $BP_{ГККВС} = 4,406 \cdot 10^{38}$ (табл. 1) методом МВК могут быть вычислены ТР из области параметров мощности

$$TP(МВК, ГККВС) = \sum_{N=2}^{12} 5 \cdot N + \sum_{N=13}^{256} \max n(N, BP_{ГККВС} = 4,406 \cdot 10^{38}) = 14579, \quad (23)$$

что составляет 8,86% от общего числа необходимых для расчета ТР (17).

Полученные выше значения, отражающие возможность расчета точных распределений (ТР), совместно приведены в табл. 3.

Таблица 3

Возможности методов расчета точных распределений при использовании различных вычислительных технологий

№ п/п	Метод расчета	Параметры	Вычислительные технологии производительность (оп./сек.)		
			многопроцессорные МВС (10^{18})	фотонные УГЭФВС (10^{19})	квантовые ГККВС ($1,7 \cdot 10^{32}$)
1	МПК	Размер области расчета (количество пар параметров)	731	786	1549
2		Размер области расчета в % от размера всей области необходимого расчета	0,44	0,48	0,94
3		Максимальная мощность алфавита N при $n=2$	46	48	76

4		Максимальная длина последовательности n при мощность алфавита $N=2$	>130	>170	>450
5	МВК	Размер области расчета (количество пар параметров)	8749	9182	14579
6		Размер области расчета в % от размера всей области необходимого расчета	5,32	5,58	8,86
7		Максимальная мощность алфавита N при $n=2$	>32768	>32768	>32768
8		Максимальная длина последовательности n при мощность алфавита $N=2$	37	39	61

Анализируя данные табл. 3, необходимо отметить, что применение метода МВК по сравнению с методом МПК увеличивает возможности по расчету ТР, что подтверждает предыдущие выводы по сравнению двух этих методов [23]:

1) применение метода МВК по сравнению с методом МПК позволяет увеличить количество возможных для расчета ТР для всех вычислительных технологий: в 11,9 раза для МВС, в 11,7 раз для УГЭФВС и в 9,4 раза для ГККВС (строки 1 и 5 табл. 1);

2) использование метода МПК ограничивает мощность алфавита N выборок, для которых возможен расчет ТР – 46 знаками для МВС, 48 знаками для УГЭФВС и 76 знаками для ГККВС (строка 3 табл. 3), при этом метод МВК таких ограничений не несет (строка 7 табл. 3);

3) в областях малых значений мощности алфавита N выборок (строки 4 и 8 табл. 1) метод МПК позволяет по сравнению с методом МВК рассчитывать ТР для выборок большего объема n , хотя в этом нет прямой необходимости, так как в этой области (рис. 1 область 1) применимы предельные распределения;

Данные из табл. 3 по увеличению возможностей расчета ТР с ростом производительности применяемых вычислительных технологий приведены в табл. 4 и проиллюстрированы на рис. 2., где значения на рис. а, определяющие число ТР, показаны в логарифмическом виде.

Таблица 4

Увеличение возможностей расчета точных распределений при использовании более производительных вычислительных технологий

№ п/п	Параметры возможности расчета точных распределений	Методы расчета					
		МПК			МВК		
		Вычислительные технологии					
		МВС (10^{18})	УГЭФВС (10^{19})	ГККВС ($1,7 \cdot 10^{32}$)	МВС (10^{18})	УГЭФВС (10^{19})	ГККВС ($1,7 \cdot 10^{32}$)
1	Размер области расчета (количество пар параметров)	731	786	1549	8749	9182	14579
2	Размер области расчета в % от размера всей области необходимого расчета	0,44	0,48	0,94	5,32	5,58	8,86
3	Увеличение возможностей расчета (число раз)	1	1,075	1,971	5,648	1,049	1,588

Анализ данных показывает, что при увеличении производительности используемых вычислительных технологий происходит рост возможностей по расчету ТР, но даже при использовании самых мощных из них квантовых технологий он не превосходит 8,86% от общего количества ТР, необходимых для расчета при проведении статистического анализа дискретных последовательностей в алфавитах мощности N до 256 знаков.

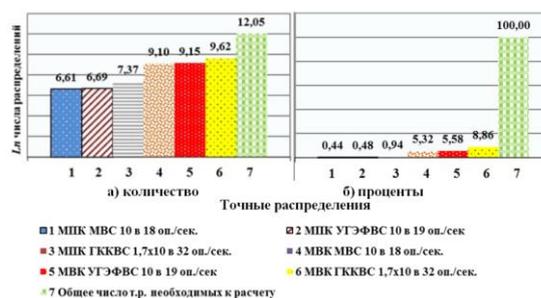


Рис. 3. Области параметров выборок доступных для расчета точных распределений для различных методов и вычислительных технологий

Заключение и выводы. Для решения задачи расчета точных распределений вероятностей значений статистик, определяющих обоснованность применения статистических методов анализа дискретных последовательностей, проведено исследование возможности применения перспективных фотонных и квантовых вычислительных технологий в целях определения максимальных значений параметров последовательностей (выборок), для которых они могут быть рассчитаны.

В результате проведенных исследований было установлено следующее:

1. Расчет точных распределений, необходимыми для анализа дискретных последовательностей, является вычислительно трудоемкой задачей, для решения которой требуется применение наиболее высокопроизводительных вычислительных систем, основанных как на современных многопроцессорных вычислительных технологиях, так и на перспективных фотонных и квантовых технологиях.

2. Для определения возможности применения современных и перспективных вычислительных технологий для расчета точных распределений были проанализированы возможности использования имеющихся методов их расчета, основанных на нахождении неотрицательных целочисленных решений линейного уравнения либо системы линейных уравнений.

3. Показано, что дискретные фотонные вычислительные технологии в виде универсальных гибридных электронно-фотонных вычислительных систем могут быть применены для расчета точных распределений имеющимися методами при наличии действующих образцов вычислительной техники.

4. Квантовые вычислительные технологии, основанные на квантовой суперпозиции и запутанности, при наличии работающего технического образца могут быть применены к методам расчета распределений, основанным на решении линейного уравнения кратности типов, и, при наличии квантового алгоритма решения системы линейных уравнений, к методу, основанному на его решении.

5. Применение дискретных фотонных технологий позволяет увеличить общее количество вычисленных точных распределений и увеличить значение параметров последовательностей, для которых они могут быть рассчитаны.

5.1. Позволяет при использовании метода МВК незначительно в 1,049 раза увеличить по сравнению с применением многопроцессорных технологий число рассчитанных точных распределений и довести их количество до 5,58% от общего необходимо количества рассчитываемых распределений.

5.2. Применение метода МВК обеспечивает расчет точных распределений для длин последовательностей не более 32 знаков, но для всех алфавитов мощности менее 32758 знаков.

6. Применение квантовых вычислительных технологий позволяет увеличить общее количество рассчитанных точных распределений и увеличить значения параметров последовательностей, для которых они могут быть рассчитаны при применении метода МПК, основанного на решении линейного уравнения.

6.1. Увеличить количество рассчитанных точных распределений в 2,14 и в 1,96 раза по сравнению с применением многопроцессорных и фотонных технологий соответственно, но при этом общее число вычисленных точных распределений составит менее одного процента (0,94%) от общего количества.

6.2. Увеличить в 1,65 и 1,58 раза мощность алфавита при расчете распределений для последовательностей длины 2 и увеличить его до 76 знаков.

7. Результаты применения квантовых технологий при расчете точных распределений с использованием метода МПК, основанного на решении линейного уравнения, уступают результатам применения фотонных и даже многопроцессорных технологий при использовании для расчета распределений метода МКВ, основанного на решении системы линейных уравнений. Так, количество точных распределений, рассчитанных с помощью более производительных квантовых технологий в 5,66 и 5,94 раза меньше количества точных распределений, рассчитанных с помощью многопроцессорных и фотонных технологий, соответственно, при применении метода МКВ, основанного на решении системы линейных уравнений.

8. Применение фотонных и квантовых вычислительных технологий, даже при наличии работающих технических образцов и разработанных квантовых алгоритмов решения систем линейных уравнений не решает целиком проблему расчета точных распределений для последовательностей в алфавитах мощности даже до 256 знаков, так как максимально позволяют провести расчет всего лишь 5,58% распределений для фотонных и 8,86% распределений для квантовых технологий от общего числа требующих расчета точных распределений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мельников С.Ю., Мецераков Р.В., Пересыткин В.А. Некоторые аспекты применения технологий искусственного интеллекта в задачах защиты информации (Обзор) // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 5 (241). – С. 58-68. – ISSN 1999-9429. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-58-68.
2. Мельников А.К., Ронжин А.Ф. Обобщенный статистический метод анализа текстов, основанный на расчете распределений вероятности значений статистик // Информатика и её применения. – 2016. – Т. 10. – Вып. 4 (октябрь-декабрь). – С. 89-95. – ISSN 1992-2264.
3. Мельников А.К. Сложность расчета точных распределений вероятности симметричных аддитивно разделяемых статистик и область применения предельных распределений // Доклады ТУСУР. – Томск, 2017. – Т. 20, № 4. – С. 126-130. – ISSN 1818-0442. – doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-126-130.
4. Зелюкин Н.Б., Мельников А.К. Сложность расчета точных распределений вероятности значений статистик и область применения предельных распределений // Электронные средства и системы управления: Матер. докладов XIII Междунар. науч.-практ. конф. (29 ноября – 1 декабря 2017 г.): в 2 ч. Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2017. – С. 84-90. – ISBN 978-591191-364-9.
5. Список TOP500 редакция от 06/2025. – <https://www.top500.org> (дата обращения: 08.07.2025).
6. Создан прототип компьютера, работающего со «скоростью света». – <https://news.mail.ru/society/65613497/> (дата обращения: 08.04.2025).
7. Российские учёные к 2027 году представят компьютер, работающий «со скоростью света». – <https://habr.com/ru/news/863000/> (дата обращения: 08.04.2025).
8. Алиев Ф.К., Букин Е.Г., Корольков А.В., Матвеев Е.А. Квантовая фотонная компьютерная технология решения сложных вычислительных задач систем высокой доступности // Системы высокой доступности. – 2021. – Т. 17, № 14. – С. 34-54. – DOI: <https://doi.org/10.18127/j20729472-202104-03>.
9. Японский суперкомпьютер Fugaku упрочил свое лидерство в списке TOP500. – URL: <https://www.ixbt.com/news/2020/11/18/japonskij-superkompjuter-fugaku-uprochil-svoe-liderstvo-v-spiske-top500.html> (дата обращения: 25.03.2021).
10. Han-Sen Zhong, Hui Wang, Yu-Hao Deng et al. Quantum computational advantage using photons. – URL: <https://science.sciencemag.org/content/370/6523/1460.full> (дата обращения: 15.10.2024).
11. Han-Sen Zhong et al. Phase Programmable Gaussian Boson Sampling Using Stimulated Squeezed Light. Phys. Rev. Lett. 127/180502 Published 25 October 2021.
12. Lars S. Madsen et al. Quantum computational advantage with a programmable photonic processor // Nature. – 2022. – Vol. 606. – P. 75-81. – DOI: 10.1038/s41586-022-04725-x.
13. Фишер Р.А. Статистические методы для исследователей: пер. с англ. – М.: Госстатиздат, 1958. – 73 с.

14. Мельников А.К. Применение точных и предельных приближений распределений вероятностей значений статистик при решении задачи обработке текстов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 8 (202). – С. 114-135. – ISSN 1999-9429. – doi: 10.23683/2311-3103-2018-8-114-135.
15. Зубков А.М., Филина М.В. Точное вычисление распределений с помощью цепей Маркова // ПДМ. Приложение. – 2012. – № 5. – С. 114-116.
16. Филина М.В. Алгоритмы точного вычисления распределений статистики Пирсона и результаты численных экспериментов // XV Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Тюмень, 29–31 октября 2014 г.), ИВТ СО РАН, Новосибирск, 2014. – С. 52.
17. Зубков А.М., Филина М.В. Алгоритм точного вычисления распределений разделимых статистик и его применения // Аналитические и вычислительные методы в теории вероятностей и ее приложениях (Москва, 23–27 октября 2017 г.) / ред. А.В. Лебедев, РУДН, Москва, 2017. – С. 490-494.
18. Зубков А.М., Филина М.В. Вычисление распределений статистик с помощью цепей Маркова // Дискретная математика. – 2020. – 32:4. – С. 38-51.
19. Мельников А.К. Алгоритмическая сложность расчета точных приближений распределений вероятностей значений статистик методом решения уравнения первой кратности типов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 7 (217). – С. 52-67. – ISSN 1999-9429. – DOI 10.18522/2311-3103-2020-7-52-67.
20. Мельников А.К., Левин И.И., Дордопуло А.И., Слостен Л.М. Оценка возможностей перспективных вычислительных технологий для расчета точных приближений распределений вероятностей значений статистик // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 4 (228). – С. 50-62. – ISSN 1999-9429. – doi: 10.18522/2311-3103-2022-4-50-62.
21. Мельников А.К. Ограничение количества различных опробуемых векторов для получения всех решений системы линейных уравнений второй кратности на многопроцессорной вычислительной системе // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 2 (219). – С. 167-181. – ISSN 1999-9429. – doi: 10.18522/2311-3103-2021-2-167-181.
22. Крамер Г. Математические методы статистики: пер. с англ. – М. Мир, 1975. – 648 с.
23. Мельников А.К. Выбор метода расчета точных приближений дискретных распределений вероятностей значений статистик // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2021. – Т. 18, № 6 (204). – С. 39-48. – DOI 10.14489/vkit.2021.06.pp.039-048.

REFERENCES

1. Mel'nikov S.Yu., Meshcheryakov R.V., Peresyupkin V.A. Nekotorye aspekty primeneniya tekhnologiy iskusstvennogo intellekta v zadachakh zashchity informatsii (Obzor) [Some aspects of application of artificial intelligence technologies in information security (review)], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 5 (241), pp. 58-68. ISSN 1999-9429. DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-58-68.
2. Mel'nikov A.K., Ronzhin A.F. Obobshchennyi statisticheskiy metod analiza tekstov, osnovannyi na raschete raspredeleniy veroyatnosti znacheniy statistik [Generalized statistical method of text analysis based on calculation of probability distribution of statistical values], *Informatika i ee primeneniya* [Informatics and its applications], 2016, Vol. 10, Issue 4 (October-December), pp. 89-95. ISSN 1992-2264.
3. Mel'nikov A.K. Slozhnost' rascheta tochnykh raspredeleniy veroyatnosti simmetrichnykh additivno razdelyaemykh statistik i oblast' primeneniya predel'nykh raspredeleniy [The complexity of calculating the exact probability distributions of symmetric additive-separated statistics and the application of limit distributions], *Doklady TUSUR* [Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics]. Tomsk, 2017, Vol. 20, No. 4, pp. 126-130. ISSN 1818-0442. doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-126-130.
4. Zelyukin N.B., Mel'nikov A.K. Slozhnost' rascheta tochnykh raspredeleniy veroyatnosti znacheniy statistik i oblast' primeneniya predel'nykh raspredeleniy [The complexity of calculating exact probability distributions of statistical values and the scope of application of limit distributions], *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya: Mater. dokladov XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (29 noyabrya – 1 dekabrya 2017 g.)* [Electronic means and control systems: Proceedings of the XIII International scientific and practical conference (November 29 – December 1, 2017)]: In 2 part. Part 2. Tomsk: V-Spektr, 2017, pp. 84-90. ISBN 978-591191-364-9.
5. Spisok TOP500 redaktsiya ot 06/2025 [TOP500 list, edition 06/2025]. Available at: <https://www.top500.org> (accessed 08 July 2025).
6. Sozdan prototip komp'yutera, rabotayushchego so «skorost'yu sveta» [A prototype computer that works at the “speed of light” has been created]. Available at: <https://news.mail.ru/society/65613497/> (accessed 08 April 2025).

7. Rossiyskie uchenye k 2027 godu predstavlyat komp'yuter, rabotayushchiy «so skorost'yu sveta» [Russian scientists to present computer operating at “speed of light” by 2027]. Available at: <https://habr.com/ru/news/863000/> (accessed 08 April 2025).
8. Aliev F.K., Bukin E.G., Korol'kov A.V., Matveev E.A. Kvantovaya fotonnaya komp'yuternaya tekhnologiya resheniya slozhnykh vychislitel'nykh zadach sistem vysokoy dostupnosti [Quantum photonic computer technology for solving complex computational problems of high-availability systems], *Sistemy vysokoy dostupnosti* [High availability systems], 2021, Vol. 17, No. 14, pp. 34-54. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20729472-202104-03>.
9. Yaponskiy superkomp'yuter Fugaku uprochil svoe liderstvo v spiske TOP500 [Japanese supercomputer Fugaku strengthened its leadership in the TOP500 list]. Available at: <https://www.ixbt.com/news/2020/11/18/japonskiy-superkompjuter-fugaku-uprochil-svoe-liderstvo-v-spiske-top500.html> (accessed 25 March 2021).
10. Han-Sen Zhong, Hui Wang, Yu-Hao Deng et al. Quantum computational advantage using photons. Available at: <https://science.sciencemag.org/content/370/6523/1460.full> (accessed 15 October 2024).
11. Han-Sen Zhong et al. Phase Programmable Gaussian Boson Sampling Using Stimulated Squeezed Light. *Phys. Rev. Lett.* 127/180502 Published 25 October 2021.
12. Lars S. Madsen et al. Quantum computational advantage with a programmable photonic processor, *Nature*, 2022, Vol. 606, pp. 75-81. DOI: 10.1038/s41586-022-04725-x.
13. Fisher R.A. Statisticheskie metody dlya issledovateley [Statistical methods for researchers]: transl. from Engl. Moscow: Gosstatizdat., 1958, 73 p.
14. Mel'nikov A.K. Primenenie tochnykh i predel'nykh priblizheniy raspredeleniy veroyatnostey znacheniy statistik pri reshenii zadachi obrabotke tekстов [Application of exact and limit approximations of statistics probability distributions for the problem of text processing], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 8 (202), pp. 114-135. ISSN 1999-9429. doi: 10.23683/2311-3103-2018-8-114-135.
15. Zubkov A.M., Filina M.V. Tochnoe vychislenie raspredeleniy s pomoshch'yu tsepey Markova [Exact calculation of distributions using Markov chains], *PDM. Prilozhenie* [PDM. Appendix], 2012, No. 5, pp. 114-116.
16. Filina M.V. Algoritmy tochnogo vychisleniya raspredeleniy statistiki Pirsona i rezul'taty chislennykh eksperimentov [Algorithms for the exact calculation of Pearson statistics distributions and the results of numerical experiments], *XV Vserossiyskaya konferentsiya molodykh uchennykh po matematicheskomu modelirovaniyu i informatsionnym tekhnologiyam (Tyumen', 29–31 oktyabrya 2014 g.)*, *IVT SO RAN, Novosibirsk, 2014* [XV All-Russian Conference of Young Scientists on Mathematical Modeling and Information Technology (Tyumen, October 29–31, 2014), ICT SB RAS, Novosibirsk, 2014], pp. 52.
17. Zubkov A.M., Filina M.V. Algoritm tochnogo vychisleniya raspredeleniy razdelimyykh statistik i ego primeneniya [An algorithm for the exact calculation of distributions of separable statistics and its applications], *Analiticheskie i vychislitel'nye metody v teorii veroyatnostey i ee prilozheniyakh (Moskva, 23–27 oktyabrya 2017 g.)* [Analytical and computational methods in probability theory and its applications (Moscow, October 23–27, 2017)], red. A.V. Lebedev, RUDN, Moscow, 2017, pp. 490-494.
18. Zubkov A.M., Filina M.V. Vychislenie raspredeleniy statistik s pomoshch'yu tsepey Markova [Calculating distributions of statistics using Markov chains], *Diskretnaya matematika* [Discrete Mathematics], 2020, 32:4, pp. 38-51.
19. Mel'nikov A.K. Algoritmicheskaya slozhnost' rascheta tochnykh priblizheniy raspredeleniy veroyatnostey znacheniy statistik metodom resheniya uravneniya pervoy kratnosti tipov [Algorithmic complexity of calculating exact approximations of probability distributions of statistical values by solving the equation of the first multiplicity of types], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 7 (217), pp. 52-67. ISSN 1999-9429. DOI 10.18522/2311-3103-2020-7-52-67.
20. Mel'nikov A.K., Levin I.I., Dordopulo A.I., Slasten L.M. Otsenka vozmozhnostey perspektivnykh vychislitel'nykh tekhnologiy dlya rascheta tochnykh priblizheniy raspredeleniy veroyatnostey znacheniy statistik [Analysis of advanced computer technologies for calculation of exact approximations of statistics probability distributions], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4 (228), pp. 50-62. ISSN 1999-9429. DOI 10.18522/2311-3103-2022-4-50-62.
21. Mel'nikov A.K. Ogranichenie kolichestva razlichnykh oprobuemykh vektorov dlya polucheniya vsekh resheniy sistemy lineynykh uravneniy vtoroy kratnosti na mnogoprotsessornoy vychislitel'noy sisteme [Limiting the number of different test vectors to obtain all solutions of a system of linear equations of the second multiplicity on multiprocessor computer system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 2 (219), pp. 167-181. ISSN 1999-9429. doi: 10.18522/2311-3103-2021-2-167-181.

22. *Kramer G.* Matematicheskie metody statistiki [Mathematical methods of statistics]: transl. from Engl. Moscow: Mir, 1975, 648 p.
23. *Mel'nikov A.K.* Vybora metoda rascheta tochnykh priblizheniy diskretnykh raspredeleniy veroyatnostey znacheniy statistik [Choosing the Method of Exact Approximations of Discrete Statistics Probability Distributions], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy], 2021, Vol. 18, No. 6 (204), pp. 39-48. DOI 10.14489/vkit.2021.06.pp.039-048.

Мельников Андрей Кимович – АО «Вычислительные решения»; e-mail: anta-mak@umail.ru; ak@comp-sol.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84957693030; г.н.с.; д.т.н.; доцент ВАК.

Melnikov Andrey Kimovich – JSC "Computing Solutions"; e-mail: anta-mak@umail.ru; ak@comp-sol.ru; Moscow, Russia; phone: +74957693030; chief researcher officer, dr. of eng. sc.; associate professor of the Higher Attestation Commission.

УДК 519.857.6:656.025.415

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-136-145

И.Н. Розенберг, И.А. Дубчак

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНВАРИАНТОВ НЕЧЕТКОГО ГРАФА ДЛЯ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются вопросы оценки устойчивости транспортно-логистических систем (ТЛС) в условиях неопределенности, которые играют ключевую роль в обеспечении эффективного функционирования цепей поставок. Устойчивость систем анализируется в контексте их способности адаптироваться к внешним и внутренним воздействиям, таким как экономические колебания, изменение спроса, стихийные бедствия и технологические сбои. В данной статье предлагается использовать инварианты нечетких множеств, а именно нечеткое доминирующее множество, для оценки и анализа устойчивости транспортно-логистических систем в условиях неопределенности. Показано, что нечеткое доминирующее множество позволяет решать задачу размещения распределительных узлов в транспортно-логистической системе. Приведены примеры нахождения нечетких доминирующих множеств для нечетких и нечетких темпоральных графов как моделей транспортно-логистической системы. Нечеткие темпоральные графы также позволяют проводить более адекватное моделирование и анализ систем в случаях, когда параметр времени является одним из важных факторов. Практическая значимость исследования заключается в возможности проектирования более надежных и адаптивных ТЛС, способных эффективно функционировать в условиях неопределенности. Результаты могут быть использованы для оптимизации логистических процессов, снижения затрат и повышения устойчивости цепочек поставок. Полученные выводы также открывают перспективы для дальнейших исследований в области интеграции методов искусственного интеллекта и анализа больших данных в управлении транспортными системами. Дальнейшие исследования предлагается направить на интеграцию методов оптимизации потоков с учетом временных факторов и разработку цифровых двойников ТЛС.

Транспортно-логистическая система (ТЛС); неопределенность; устойчивость системы; нечеткий граф; нечеткий темпоральный граф; нечеткое доминирующее множество; динамические параметры.

I.N. Rozenberg, I.A. Dubchak

USING FUZZY GRAPH INVARIANTS FOR THE STABILITY ANALYSIS OF COMPLEX TRANSPORT SYSTEMS

This article examines the issues of assessing the sustainability of transport and logistics systems (TLS) under conditions of uncertainty, which play a key role in ensuring the effective functioning of supply chains. The sustainability of systems is analyzed in the context of their ability to adapt to external and internal influences, such as economic fluctuations, changes in demand, natural disasters and technological failures. In this paper, it is proposed to use fuzzy graph invariants, namely, a fuzzy dominating set, to assess and analyze the sustainability of transport and logistics systems under uncertainty. It is shown that a fuzzy dominating set allows solving the problem of placing distribution hubs in a transport and logistics system. Examples of finding fuzzy dominating sets for fuzzy and fuzzy temporal graphs as the models of transport and logistic system are presented. Fuzzy temporal graphs also allow for more adequate modeling and analysis of systems in cases where the time parameter is one of the important factors. The practi-

cal significance of the study lies in the possibility of designing a more reliable and adaptive TLS capable of functioning effectively under conditions of uncertainty. The results can be used to optimize logistics processes, reduce costs and increase the sustainability of supply chains. The findings also open prospects for further research in the field of integrating artificial intelligence methods and big data analysis in transport system management. Further research is proposed to be directed at integrating flow optimization methods considering time factors and developing digital twins of TLS.

Transport and logistics system (TLS); uncertainty; system stability; fuzzy graph; fuzzy temporal graph; fuzzy domination set; dynamic parameters.

Введение. Транспортная система играет важнейшую роль в устойчивом развитии общества и экономики. Она служит связующим звеном между различными регионами, обеспечивая перемещение людей и грузов. Глобальные тенденции показывают, что рынок транспортных услуг становится всё более комплексным и сложным, и все его составляющие интегрируются с использованием логистических концепций и новейших технологий, формируя понятие – транспортно-логистическая система.

Транспортно-логистическая система (ТЛС) представляет собой объединение различных аспектов логистической деятельности, таких как управление запасами, обработка грузов, складское хозяйство и обмен информацией. Для достижения наивысшей эффективности в ТЛС необходим современный подход, который учитывает как процессы, так и ресурсы. Этот подход включает в себя системное мышление, прогнозирование, управление и принятие решений в условиях неопределенности.

С точки зрения организационно-технического подхода, главной целью ТЛС является обеспечение устойчивости системы путем внедрения механизмов управления потоками и гарантии надежности всех процессов. Компетенции, сосредоточенные в рамках ТЛС, отражают потенциал системы по доставке грузов конечному потребителю как на стратегическом, так и на тактическом уровнях. К основным компетенциям относятся развитие инфраструктуры, управление запасами и процессами хранения, обработка грузов и упаковка, а также эффективный обмен информацией между участниками логистической цепи. Ключевыми обстоятельствами, оказывающими отрицательное воздействие на развитие транспортной инфраструктуры, являются низкий объем грузопотоков в портовых терминалах; ограниченные возможности подъездных путей к морским портам; а также различные риски, связанные с политической, социальной, природной и климатической сферами.

Таким образом, для успешного функционирования транспортной системы требуется комплексный подход к управлению, что, в свою очередь, способствует улучшению качества жизни населения и устойчивому развитию экономики.

В работе [1] отмечено, что обычно ТЛС оцениваются с помощью разнообразных показателей, которые представляют собой конкретные переменные, подходящие для количественной оценки. Эти индикаторы играют важную роль в установлении базовых данных, выявлении тенденций, предсказании возможных проблем, оценке альтернатив, формировании целевых показателей эффективности и анализе конкретных юрисдикций или организаций. Отмечено, что выбор индикаторов может значительно повлиять на результаты анализа. Методология, которая может казаться полезной и желательной при использовании одного набора показателей, может оказаться вредной и нежелательной при применении других.

Авторы исследования [2] акцентируют внимание на том, что ограниченность ресурсов в транспортных компаниях требует рационального подхода к их использованию. Для разработки стратегии развития необходимо применять системный анализ, который позволит оценить риски и неопределенности, характерные для данного сектора. В работе предложена концепция, основанная на принципах формирования стратегий с учетом факторов риска, а также использование модели для достижения долгосрочных целей. Циклический процесс стратегического анализа рисков в условиях неопределенности призван уменьшить разрыв между поставленными целями и фактическими результатами.

Многие авторы отмечают, что функционирование ТРС происходит в условиях значительной неопределенности. Эта неопределенность обусловлена нерегулярностью производственных процессов, характером обслуживаемых отраслей экономики и нестабиль-

ностью работы отдельных компонентов системы. К числу факторов, способствующих этой ситуации, относятся неритмичность технологических процессов и вариативность продолжительности различных транспортных и технологических операций [3–6]. Нельзя не отметить, что отмеченные факторы существенно влияют на устойчивость системы, в том числе на управление цепочкой поставок.

В [7–9] были исследованы подходы к выявлению факторов, влияющих на построение цепочек поставок в транспортно-логистических системах. На основе многомерного аналитического обзора научных источников обоснована классификация внутренних и внешних факторов, влияющих на управление цепями поставок в ТЛС.

При этом отмечено [10, 11], что применение графовых моделей для решения задач ТЛС позволяет снизить сложность сетевых путей, затраты и время на создание и обслуживание сети на основе систем. Теория графов может быть использована для поиска сообществ (взаимозависимых множеств) в сетях, а также в качестве аппарата для моделирования и описания реальных сетевых систем, таких как транспорт, вода, электричество, интернет, схемы рабочих операций в процессе производства, строительства и т.д.

Одним из важных факторов, оказывающих значительное влияние на транспортно-логистические системы, является неопределенность [12]. Это явление можно охарактеризовать как объективное, поскольку оно связано с присутствием элементов, при которых результаты действий невозможно предсказать с высокой точностью, а влияние этих элементов на результат остается неизвестным [13, 14]. Неопределенность также может проявляться в виде недостатка или неточности информации об условиях реализации товара. При разработке управленческих решений важно учитывать воздействие неопределенных факторов и тщательно анализировать все возможные последствия различных альтернатив, которые могут быть предложены для выбора.

Помимо оценки устойчивости, многофакторности и неопределенности параметров ТЛС необходимо учесть, что значение ее параметров в различные моменты времени могут изменяться. Данные изменения могут существенно влиять на принятия решений в различные моменты времени. Все эти аспекты необходимо учесть для отображения структуры функционирования ТЛС в реальных условиях.

В случае, когда модель ТЛС представима в виде графа [15, 16], для оценки и анализа ее устойчивости естественно использовать инварианты графа: доминирующее множество, внешне устойчивое множество, множество баз и т.д. [17]. В данной работе в качестве такого инварианта предлагается использовать понятие доминирующего множества нечеткого графа (FG).

Данная статья имеет следующую структуру. Во втором разделе приведены некоторые понятия нечетких графов. В третьем разделе поставлена задача анализа и оценки факторов устойчивости ТЛС на основе графовой модели. В четвертом разделе рассматривается применение нечеткой подхода для решения задач в области ТЛС на основе нечеткого доминирующего множества. В пятом разделе анализируется применение темпоральных нечетких графов для оптимизации ТЛС с динамически изменяющимися параметрами. В заключении приводятся выводы и области дальнейших исследований.

Основные понятия и определения нечетких графов. *Ориентированным графом* [15] называется пара $G = (V, E)$, где V есть множество вершин; E есть множество ориентированных ребер - $E \subseteq V \times V$.

Нечеткий граф [16, 17] есть пара $\tilde{G} = (V, R)$, где V также есть множество вершин, R есть нечеткое отношение V , в котором элементы (ребра), соединяющие вершины V , имеют функцию принадлежности $\mu_R: V \times V \rightarrow [0, 1]$.

Пусть X есть произвольное подмножество вершин множества V . Для каждой вершины $u \in V \setminus X$, определим величину $\beta(X) = \bigwedge_{u \in V} \bigvee_{v \in X} \{\mu_R(u, v)\}$.

Множество X называется *доминирующим множеством вершин* графа \tilde{G} со *степенью доминирования* $\beta(X)$ [18, 19].

Степень доминирования $\beta(X)$ означает, что во множестве X существует некоторая вершина, которая является смежной любой другой вершине графа со степенью не менее $\beta(X)$.

Пусть Y – минимальное доминирующее подмножество со степенью $\beta(Y)$, если выполняется условие $(\forall X \subset Y)[\beta(X) < \beta(Y)]$. Пусть $Y_k = \{Y_{k1}, Y_{k2}, \dots, Y_{kl}\}$ – семейство всех минимальных доминирующих подмножеств с k вершинами и степенями доминирования $\beta_{k1}, \beta_{k2}, \dots, \beta_{kl}$, соответственно и $\beta_k^0 = \max\{\beta_{ki}\}$. Тогда множество $\tilde{D} = \{< \beta_1^0/1 >, < \beta_2^0/2 >, \dots, < \beta_n^0/n >\}$ есть нечеткое доминирующее множество графа \tilde{G} .

Нечеткий темпоральный граф есть тройка $\tilde{G} = (V, \{\tilde{T}_t\}, T)$ [20], где множество V есть множество вершин ($|X|=n$), множество целых чисел $t=\{1,2,\dots,T\}$ определяет дискретное время, а $\{\tilde{T}_t\}$ определяет нечеткое семейство соответствий, отображающих вершины V в себя в моменты времени $t = \overline{1, T}$.

Решение задачи в четкой постановке. Пусть необходимо спроектировать ТЛС. В выделенной области в точках (пунктах) x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 планируется разместить распределительные узлы (рис. 1).

Указанные места могут представлять собой не только распределительные центры, но и склады различного назначения, производственные предприятия и т.д. Необходимо разместить распределительные узлы в ТЛС таким образом, чтобы узлы, могли выполнять свои функции без необходимости взаимодействия друг с другом. То есть нужно определить перечень обоснованного и достаточного наличия распределительных узлов.

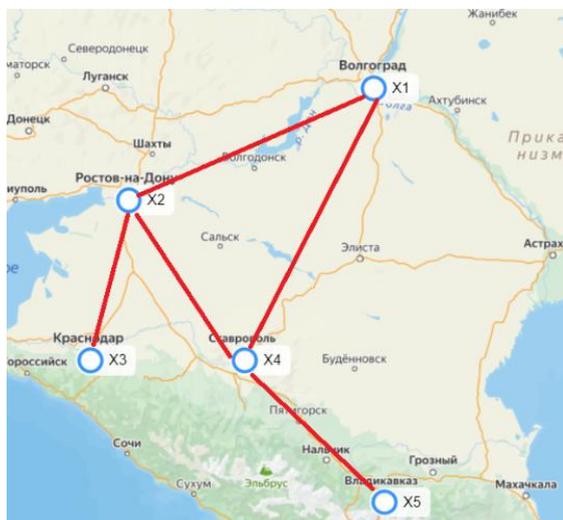


Рис. 1. Пример карты исследуемой области

В этом случае естественной моделью ТЛС является ее представление в виде графа, в котором вершины отображают распределительные центры, а ребра – связи между ними.

Также важно учитывать временные аспекты изменения параметров, характеризующие связи между точками на карте: загруженности дорог (скорость движения, пробки и остановки), стоимость перевозки (топливо, платные дороги и т.д.), нагрузка и ограничение по весу на данном участке дороги, состояние дороги (наличие ремонтов или строительных работ, которые могут замедлить движение), статистика аварийности на данном участке дороги, погодные условия, наличие заправок, пунктов отдыха и т.д.

При этом необходимо, чтобы ТЛС могла не только обособленно функционировать, но и могла адаптироваться и быстро переключаться между различными узлами, не нарушая общую цепь поставок в зависимости от поставленной задачи.

Структура ТЛС может изменяться ввиду различных событий, которые нарушают поток товаров или услуг в системе [21]. Постоянно увеличивающаяся масштабность ТЛС делает их более уязвимыми к разнообразным событиям. Для создания эффективных ТЛС необходимо обеспечить их надежность и устойчивость как в нормальных условиях, так и в ситуациях, когда возникают непредсказуемые и непредсказуемые нештатные обстоятельства.

Решение задачи в нечеткой постановке. При определении связей между вершинами графа, в четкой постановке, ребрам назначались значения либо 0, либо 1, по наличию, либо отсутствию соответствующей связи. На практике функционирование ТЛС невозможно оценить однозначными критериями в рамках данных значений. ТРС представляет собой сложную многопараметричную систему со множеством условий. Также на наличие связей могут быть наложены различные условия: например, качество дорожного покрытия, наличие пробок на дорогах, спрос и т.д., При этом необходимо учесть, что пути в ТЛС двунаправлены и имеют различные значения оцениваемых характеристик.

Для определения оценки связей между вершинами графа необходимо применение математического аппарата, позволяющего учесть неоднозначность (либо качественность оценок параметров). Именно применение нечеткой логики обеспечит построение адекватной модели ТЛС в виде нечеткого графа [16, 17], где взаимодействия между элементами могут быть нечеткими. Использование нечетких графов позволяет вводить более гибкие критерии для оценки устойчивости, учитывая различные степени принадлежности ребер к определенным категориям.

Оценка устойчивости в транспортно-логистических системах позволяет определить слабые места в системе, которые могут привести к сбоям или снижению эффективности в условиях внешних или внутренних возмущений. Методы определения внутренние и внешне устойчивых множеств на графах могут быть применены в рамках транспортно-логистических систем (ТЛС). Так, например, внутренние устойчивые множества в ТЛС могут представлять собой ключевые узлы (например, склады, распределительные центры), удаление которых не приведёт к полной потере связи между остальными узлами сети. Что позволит ТЛС оставаться функциональными даже при сбоях или отказах в определенных точках. А внешние устойчивые множества могут представлять собой маршруты или транспортные средства, которые, если будут удалены, потребуют дополнительных ресурсов для восстановления нормальной работы системы, включая необходимость перенаправления грузов или использования альтернативных маршрутов.

В [22] предложено нахождение доминирующего нечеткого множества на основе алгоритма Магу.

Пусть множество X есть доминирующее множество графа \tilde{G} со степенью β . Тогда для произвольной вершины $x_i \in V$ справедливо:

$$(\forall x_i \in V)[x_i \in X \vee (\exists x_j \in X[\mu(x_j, x_i) \geq \beta])]. \quad (1)$$

Для каждой вершины $x_i \in V$ назначим Булеву переменную p_i такую, что, если $x_i \in X$ то $p_i = 1$, and 0 в противном случае. Назначим переменную $\xi_{ji} = \beta$ для выражения $\mu(x_j, x_i) \geq \beta$. Переходя от формы квантора предложения (1) к форме в терминах логических операций, мы получаем истинность логического предложения:

$$\Phi_D = \&_i \left(\bigvee_j (p_j \& \xi_{ji}) \right).$$

Далее раскрываем скобки воспользовавшись правилами нечеткого поглощения:

$$a \& a \wedge b = a; \xi' \wedge a \vee \xi'' \wedge a \wedge b = \xi' \wedge a, \text{ if } \xi' \geq \xi''. \quad (2)$$

Получим:

$$\Phi_D = \bigvee_{i=1, l} (p_{1i} \& p_{2i} \& \dots \& p_{ki} \& \beta_i). \quad (3)$$

Каждый дизъюнктивный член в выражении (3) определит подмножество вершин, которое образует минимальное доминирующее подмножество с вычисленной степенью β_i .

Пусть дан нечеткий ориентированный граф (рис. 2) с соответствующими весами на ребрах. В рамках рассматриваемой задачи ребра графа представляют собой транспортные маршруты между узлами (складами, транспортными локациями, потребителями), которые могут иметь различные веса, отражающие время в пути, расходы на транспортировку или надежность маршрута (например, вероятность задержек, поломок или ремонт дороги).

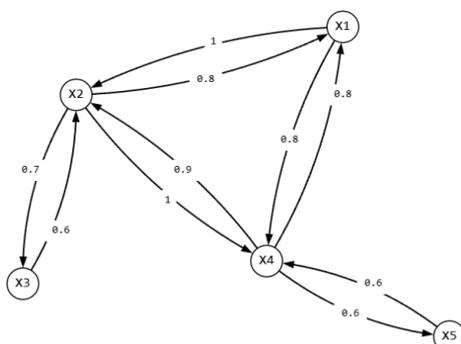


Рис. 2. Нечеткий граф ТЛС

Для рассматриваемого графа матрица смежности будет иметь вид:

$$R_X = \begin{matrix} & \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0.7 & 1 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.9 & 0 & 0 & 0.6 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix}$$

Тогда Φ_{D1} , согласно (1), для рассматриваемого графа определится как:

$$\Phi_{D1} = (1p_1 \vee 0.8p_2 \vee 0.8p_4) \& (1p_1 \vee 1p_2 \vee 0.6p_3 \vee 0.9p_4) \& (0.7p_2 \vee 1p_3) \& (0.8p_1 \vee 1p_2 \vee 1p_4 \vee 0.6p_5) \& (0.6p_4 \vee 1p_5).$$

Раскроем скобки, применим правила нечеткого поглощения (2) получим:

$$\Phi_{D1} = (0.8p_1p_3p_5 \vee 1p_1p_2p_3p_5 \vee 1p_1p_3p_4p_5 \vee 0.6p_2p_4 \vee 0.7p_2p_5 \vee 0.8p_2p_31p_5 \vee 0.6p_3p_4 \vee 0.8p_3p_4p_5).$$

Откуда следует, что граф \tilde{G} имеет 7 наименьших доминирующих подмножеств, а нечеткое доминирующее множество имеет вид:

$$\tilde{D}_1 = \{ \langle 0.7/2 \rangle, \langle 0.8/3 \rangle, \langle 1/4 \rangle \}.$$

Нечеткое доминирующее множество показывает, что:

- ◆ в графе существуют две вершины x_2, x_5 , из которых смежны все остальные вершины графа со степенью не менее 0.7;
- ◆ в графе существуют три вершины x_2, x_3, x_5 , из которых смежны все остальные вершины графа со степенью не менее 0.8;
- ◆ в графе существуют четыре вершины x_1, x_2, x_3, x_5 , из которых смежны все остальные вершины графа со степенью 1.

Необходимо отметить, что при определении нечеткого доминирующего множества на нечетких графах интерпретация полученного решения отличается от классического определения доминирующего множества четкого графа. В нечетких графах, даже если две вершины являются смежными, они могут быть частью нечеткого доминирующего множества, в случае, когда их степени принадлежности к этому множеству соответствуют заданным критериям. Это позволяет более гибко подходить к анализу графов и моделированию различных ситуаций.

Решение задачи с динамически изменяющимися параметрами. В рамках рассмотрения задачи построения эффективной транспортно-логистической системы нельзя не отметить, что значения параметров, накладываемых на ребра, могут изменяться. Так, например, в различные моменты времени (дни недели, месяцы, сезоны) время в пути, доступность маршрута, ограничения по весу и т.д. могут быть различными. При проектировании ТЛС четко определить, например, время пути от точки x_1 до точки x_2 . Данные условия можно учесть, используя темпоральные нечеткие графы.

Пусть задан нечеткий темпоральный граф $\tilde{G} = (V, \{\tilde{r}_t\}, \{1,2\})$ с сезонной оценкой пропускной способности пути (рис. 3).

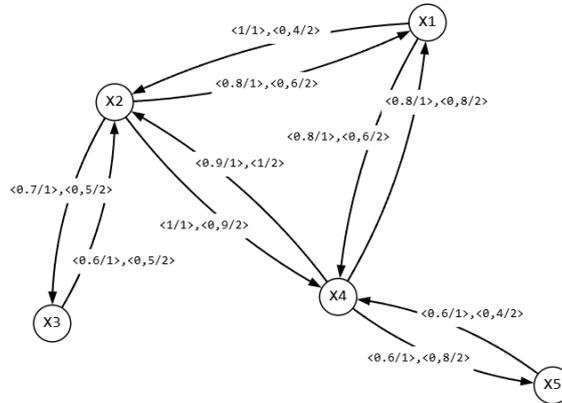


Рис. 3. Нечеткий темпоральный граф ТЛС

Оценка нечеткого доминирующего множества графа для $t=1$ была получена в предыдущем разделе. Для времени $t=2$ матрица смежности будет иметь вид:

$$R_2 = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0.4 & 0 & 0.6 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0.5 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 1 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix}.$$

Нечеткое доминирующее множество определится как:

$$\begin{aligned} \Phi_{D2} &= (1p_1 \vee 0.6p_2 \vee 0.8p_4) \& (0.4p_1 \vee 1p_2 \vee 0.5p_3 \vee 1p_4) \& (0.5p_2 \vee 1p_3) \& (0.6p_1 \\ &\vee 0.9p_2 \vee 1p_4 \vee 0.4p_5) \& (0.8p_4 \vee 1p_5) = \\ &= (0.8p_1p_3p_5 \vee 1p_1p_2p_3p_5 \vee 1p_1p_3p_4p_5 \vee 0.6p_2p_4 \vee 0.7p_2p_5 \\ &\vee 0.8p_2p_3p_5 \vee 0.6p_3p_4 \vee 0.8p_3p_4p_5.. \end{aligned}$$

Также раскрываем скобки, применяя правила нечеткого поглощения (2) получим:

$$\Phi_{D2} = 0.5p_2p_4 \vee 0.5p_2p_5 \vee 0.9p_1p_2p_3p_5 \vee 0.5p_1p_3p_5 \vee 1p_1p_3p_4p_5 \vee 0.6p_2p_3p_5 \vee 0.8p_3p_4.$$

Откуда следует, что нечеткое доминирующее множество для времени $t=2$ имеет вид:

$$\tilde{D}_2 = \{ \langle 0.8/2 \rangle, \langle 1/4 \rangle \}.$$

Для определения нечеткого доминирующего множества в любой момент времени конъюнктивно перемножим значения Φ_{D1} и Φ_{D2} :

$$\begin{aligned} \Phi_{D1} \& \Phi_{D2} &= ((0.8p_1p_3p_5 \vee 1p_1p_2p_3p_5 \vee 1p_1p_3p_4p_5 \vee 0.6p_2p_4 \vee 0.7p_2p_5 \vee 0.8p_2p_3p_5 \\ &\vee 0.6p_3p_4 \vee 0.8p_3p_4p_5) \& (0.5p_2p_4 \vee 0.5p_2p_5 \vee 0.9p_1p_2p_3p_5 \vee 0.5p_1p_3p_5 \\ &\vee 1p_1p_3p_4p_5 \vee 0.6p_2p_3p_5 \vee 0.8p_3p_4). \end{aligned}$$

В результате получаем:

$$\Phi_{D1} \& \Phi_{D2} = 0.5p_1p_3p_5 \vee 0.9p_1p_2p_3p_5 \vee 1p_1p_3p_4p_5 \vee 0.5p_2p_4 \vee 0.6p_2p_3p_5 \vee 0.8p_3p_4p_5 \vee 0.6p_3p_4.$$

Откуда следует, что нечеткое доминирующее множество в любой момент времени имеет вид:

$$\tilde{D}_{1,2} = \{ \langle 0.6/2 \rangle, \langle 0.8/3 \rangle, \langle 1/4 \rangle \}.$$

Это, в частности означает, что в любой момент времени существуют 2 вершины которые смежные со всеми остальными со степенью не менее 0.6; существуют 3 вершины которые смежные со всеми остальными со степенью не менее 0.8.

Заключение. В данной работе для оценки и анализа устойчивости ТЛС в условиях неопределенности предложено использовать инварианты нечетких графов, а именно, нечеткое доминирующее множество. Показано, что нечеткое доминирующее множество позволяет решить задачу размещения распределительных узлов ТЛС. Приведены примеры нахождения нечетких доминирующих множеств для нечеткого и нечеткого темпорального графов.

Применение нечетких темпоральных графов открывает новые возможности для анализа и позволяет учитывать неопределенность и вариативность в данных, что делает их более подходящими для сложных систем и процессов. Также нечеткие темпоральные графы позволяют более точно моделировать и анализировать системы, где время является критически важным фактором.

В дальнейших исследованиях транспортно-логистическая система будет проанализирована с точки зрения оптимизации потока, так как в теории графов внутренняя устойчивость и транспортный поток связаны через концепции устойчивости сети и ее способности поддерживать определенные уровни потока в условиях различных изменений или нарушений.

Подтверждения. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 103-00001-25-02 «Разработка и исследование методологии интеллектуального геоинформационного моделирования транспортных процессов в условиях неполноты информации».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cai J., Liu X., Xiao Z., Liu J. Improving supply chain performance management: A systematic approach to analyzing iterative KPI accomplishment // *Decision Support Systems*. – 2009. – 46 (2). – P. 512-521.
2. Izvarina N., Vorozhit L., etc. Problems of the economy and economic security in the Russian Federation in the context of digitalization // *Essence, role and the place of economic security in the system of the national security*. – 2019. – No. 4. – P. 47-60.
3. Kondratenko Y., Kondratenko G., Sidenko Ie., Taranov M. Fuzzy and Evolutionary Algorithms for Transport Logistics Under Uncertainty // *Intelligent and Fuzzy Techniques: Smart and Innovative Solution*. – 2021. – P. 1456-1463. – DOI: 10.1007/978-3-030-51156-2_169.
4. Kiselenko A.N., Sundukov E. Yu, Tarabukina N.A. World of Transport and Transportation // *Methods to Forecast Transport Systems Development under Modern Conditions*. – 2022. – Vol. 20, Issue 3 (100). – P. 158-167.
5. Scipioni A., Manzardo A., Ren J. Hydrogen Economy. Supply Chain, Life Cycle Analysis and Energy Transition for Sustainability. – Academic Press, 2017. – 328 p.
6. Cinar D., Gakis K., Pardalos P. Sustainable Logistics and Transportation: Optimization Models and Algorithms. – Springer. 2017. – 338 p.
7. Xiugang W., Lysochenko A. A. Identification of Factors Influencing the Construction of Supply Chains in China's Transport and Logistics Systems // *Management Sciences*. – 2024. – Vol. 13. – P. 428-439.
8. Osintsev N., Rakhmangulov A. Supply Chain Sustainability Drivers: Identification and Multi-Criteria Assessment // *Logistics*. – 2025. – Vol. 9, No. 1. – P. 24.
9. Karim M.R., Dulal M., Sakila F., Aditi P., Smrity S.J., Asha N.N. Analyzing the factors influencing sustainable supply chain management in the textile sector // *Cleaner Logistics and Supply Chain*. – 2024. – Vol. 13. – P. 101.
10. Kanchana M., Kavitha K. A review on transportation and smart logistics using graph theoretical approach // *Advances in Mathematics: Scientific Journal*. – 2020. – 32. – P. 612-635.
11. Yatskin D.V., Kochkarov A.A., Kochkarov R.A. Modeling of transport and logistics systems and the study of the structural stability // *Management Sciences in Russia*. – 2020. – P. 102-111.
12. Chislov O., Lyabakh N., Kolesnikov M., Bakalov M., Bezusov D. Fuzzy modelling of the transportation logistics processes // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – 14 (2). – P. 77-87.
13. Wang G. TOPSIS Evaluation System of Logistics Transportation Based on an Ordered Representation of the Polygonal Fuzzy Set // *International Journal of Fuzzy Systems*. – 2020. – Vol. 22, No. 5. – P. 1565-1581.
14. Dey B. Warehouse location selection by fuzzy multi-criteria decision making methodologies based on subjective and objective criteria. *International Journal of Management Science and Engineering Management*. – 2015. – Vol. 11, No. 4. – P. 262-278.
15. Ore O. *Theory of graphs*. Amer. Math. Soc. Colloq. – Publ. Providence, 1962.

16. Mordeson J.N. Nair P.S. Fuzzy Graphs and Fuzzy Hypergraphs // *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. – 2000. – 46.
17. Kaufmann A. Introduction a la theorie des sous-ensembles flous. – Paris: Masson, 1977.
18. Grötschel M., Lovász L., Schrijver A. Stable Sets in Graphs // *Algorithms and Combinatorics*. – 1993. – 2. – P. 272-303.
19. Берштейн Л.С., Боженюк А.В. Нечеткие графы и гиперграфы. – М.: Научный мир, 2005. – 255 с.
20. Nagoorgani A., Chandrasekaran V.T. Domination in fuzzy graph // *Advances in Fuzzy Sets and Systems*. – 2006. – 1 (1). – P. 17-26.
21. Varajão J., Lourenço J.C., Gomes J. Models and methods for information systems project success evaluation // *A review and directions for research*. – 2022. – 8 (12). – e11977.
22. Bozhenyuk A., Belyakov S., Knyazeva M., Rozenberg I. Searching Method of Fuzzy Internal Stable Set as Fuzzy Temporal Graph Invariant // *Communications in Computer and Information Science*. – 2018. – 583. – P. 501-510.

REFERENCES

1. Cai J., Liu X., Xiao Z., Liu J. Improving supply chain performance management: A systematic approach to analyzing iterative KPI accomplishment, *Decision Support Systems*, 2009, 46 (2), pp. 512-521.
2. Izvarina N., Vorozhbit L., etc. Problems of the economy and economic security in the Russian Federation in the context of digitalization, *Essence, role and the place of economic security in the system of the national security*, 2019, No. 4, pp. 47-60.
3. Kondratenko Y., Kondratenko G., Sidenko Ie., Taranov M. Fuzzy and Evolutionary Algorithms for Transport Logistics Under Uncertainty, *Intelligent and Fuzzy Techniques: Smart and Innovative Solution*, 2021, pp.1456-1463. – DOI:10.1007/978-3-030-51156-2_169.
4. Kiselenko A.N., Sundukov E. Yu, Tarabukina N.A. World of Transport and Transportation, *Methods to Forecast Transport Systems Development under Modern Conditions*, 2022, Vol. 20, Issue 3 (100), p. 158-167.
5. Scipioni A., Manzardo A., Ren J. Hydrogen Economy. Supply Chain, Life Cycle Analysis and Energy Transition for Sustainability. Academic Press, 2017, 328 p.
6. Cinar D., Gakis K., Pardalos P. Sustainable Logistics and Transportation: Optimization Models and Algorithms. Springer. 2017, 338 p.
7. Xiugang W., Lysochenko A. A. Identification of Factors Influencing the Construction of Supply Chains in China's Transport and Logistics Systems, *Management Sciences*, 2024, Vol. 13, pp. 428-439.
8. Osintsev N., Rakhmangulov A. Supply Chain Sustainability Drivers: Identification and Multi-Criteria Assessment, *Logistics*, 2025, Vol. 9, No. 1, pp. 24.
9. Karim M.R., Dulal M., Sakila F., Aditi P., Smrity S.J., Asha N.N. Analyzing the factors influencing sustainable supply chain management in the textile sector, *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 2024, Vol. 13, pp. 101.
10. Kanchana M., Kavitha K. A review on transportation and smart logistics using graph theoretical approach, *Advances in Mathematics: Scientific Journal*, 2020, 32, pp. 612-635.
11. Yatskin D.V., Kochkarov A.A., Kochkarov R.A. Modeling of transport and logistics systems and the study of the structural stability, *Management Sciences in Russia*, 2020, pp. 102-111.
12. Chislov O., Lyabakh N., Kolesnikov M., Bakalov M., Bezusov D. Fuzzy modelling of the transportation logistics processes, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 14 (2), pp. 77-87.
13. Wang G. TOPSIS Evaluation System of Logistics Transportation Based on an Ordered Representation of the Polygonal Fuzzy Set, *International Journal of Fuzzy Systems*, 2020, Vol. 22, No. 5, pp. 1565-1581.
14. Dey B. Warehouse location selection by fuzzy multi-criteria decision making methodologies based on subjective and objective criteria, *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2015, Vol. 11, No. 4, pp. 262-278.
15. Ore O. Theory of graphs. Amer. Math. Soc. Colloq. Publ. Providence, 1962.
16. Mordeson J.N. Nair P.S. Fuzzy Graphs and Fuzzy Hypergraphs, *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 2000, 46.
17. Kaufmann A. Introduction a la theorie des sous-ensembles flous. Paris: Masson, 1977.
18. Grötschel M., Lovász L., Schrijver A. Stable Sets in Graphs, *Algorithms and Combinatorics*, 1993, 2, pp. 272-303.
19. Bershteyn L.S., Bozhenyuk A.V. Nечеткие графы и гиперграфы [Fuzzy graphs and hypergraphs]. Moscow: Nauchnyy mir, 2005, 255 p.
20. Nagoorgani A., Chandrasekaran V.T. Domination in fuzzy graph, *Advances in Fuzzy Sets and Systems*, 2006, 1 (1), pp. 17-26.

21. *Varajão J., Lourenço J.C., Gomes J.* Models and methods for information systems project success evaluation, *A review and directions for research*, 2022, 8 (12), e11977.
22. *Bozhenyuk A., Belyakov S., Knyazeva M., Rozenberg I.* Searching Method of Fuzzy Internal Stable Set as Fuzzy Temporal Graph Invariant, *Communications in Computer and Information Science*, 2018, 583, pp. 501-510.

Розенберг Игорь Наумович – Российский университет транспорта; e-mail: avb@itt.net.ru, yaroshinna@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: +79166652310; д.т.н.; зав. кафедрой «Геодезия, геоинформатика и навигация».

Дубчак Ирина Александровна – Российский университет транспорта; e-mail: iri-dubchak@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79166652310; заместитель директора.

Rozenberg Igor Naumovich – Russian University of Transport; e-mail: avb@itt.net.ru, yaroshinna@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +79166652310; dr. of eng. sc.; head of the Department of Geodesy, Geoinformatics and Navigation.

Dubchak Irina Alexandrovna – Russian University of Transport; e-mail: iri-dubchak@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79166652310; deputy director.

УДК 004.056

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-145-157

Е.В. Карачанская, О.В. Рыбкина

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАЩИЩЕННОЙ ОТ ЗАРАЖЕНИЯ ВИРУСАМИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ SIR-МОДЕЛИ

Представлен анализ детерминированных моделей распространения эпидемии компьютерных вирусов (SIR-модели) и их классификация. Выделены основные направления исследований данных моделей. Приведен анализ существующих стохастических моделей на основе SIR-модели и их разнообразия. Предлагается метод построения стохастической SIR-модели на основе классической SIR-модели в виде системы стохастических дифференциальных уравнений Ито с винеровским процессом. Особенностью предложенного метода является сохранение инвариантов, один из которых присутствует в классической модели, а второй связан с постановкой задачи информационной безопасности. Показана возможность построения стохастической и детерминированной модели информационной системы, защищенной с вероятностью 1 от заражения компьютерными вирусами: стохастическая, инфицирование которой вирусами происходит непрерывно, и детерминированная, в которой вирус находится в информационной системе. Математическая модель информационной системы, защищенной от эпидемии компьютерных вирусов, строится как система стохастических дифференциальных уравнений, первыми интегралами которой являются инварианты, сохраняющиеся с вероятностью 1. В качестве показателя защищенности системы рассматривается некоторое функциональное соотношение между переменными модели, сохраняющие постоянное значение. Внесение в модель компенсатора (программное управление с вероятностью 1 (РСР1)), позволяет сохранять с вероятностью 1 заданный показатель защищенности, описанный с помощью переменных модели. Аналогичным образом, на основе предложенного алгоритма, строится детерминированная модель информационной системы, защищенной от заражения компьютерными вирусами. В построенную модель вводится управление, подобное программному управлению с вероятностью 1, которое позволит сохранять значение инвариантов. Особенность предлагаемых моделей состоит в том, что в модели сохраняются инварианты, связанные со свойствами, которые обеспечивают защищенность информационной системы. Исследование поведения построенных моделей проводится с использованием численного моделирования в среде MathCad. По результатам исследований сделаны выводы о возможности применения предложенного метода при построении стохастических моделей на основе других моделей распространения эпидемии, а также для моделей защиты информационной системы от распространения эпидемии компьютерных вирусов.

SIR-модель; информационная безопасность; модель защищенной информационной системы; сохранение свойств.

E.V. Karachanskaya, O.V. Rybkina

CONSTRUCTING A MATHEMATICAL MODEL OF A VIRUS-PROTECTED INFORMATION SYSTEM BASED ON SIR-MODEL

This article presents an analysis of deterministic models of computer virus epidemic propagation (SIR models) and their classification. The main areas of research into these models are highlighted. An analysis of existing stochastic models based on the SIR model and their diversity are presented. A method for constructing a stochastic SIR model based on the classical SIR model, represented by a system of Ito stochastic differential equations with a Wiener process, is proposed. The possibility of constructing a stochastic and deterministic model of an information system protected against computer virus infection with probability 1 is demonstrated: a stochastic model, in which infection by viruses occurs continuously, and a deterministic model, in which the virus is present in the information system. A mathematical stochastic model of an information system protected from computer virus outbreaks is constructed as a system of stochastic differential equations whose first integrals are invariants preserved with probability 1. A certain functional relationship between model variables, maintaining a constant value, is considered as the system's security indicator. Introducing a compensator (program control with probability 1 (PCPI)) into the model allows the specified security indicator, described by the model variables, to be maintained with probability 1. Introducing a compensator (program control with probability 1 (PCPI)) into the model allows the specified security indicator, described by the model variables, to be maintained with probability 1. Similarly, based on the proposed algorithm, a deterministic model of an information system protected from computer virus infection is constructed. A control similar to programmed control with probability 1 (PCPI) is introduced into the constructed model, which allows the invariants to be maintained. A distinctive feature of the proposed models is that they preserve invariants associated with the properties that ensure the security of the information system. The behavior of the constructed models is studied using numerical simulation in the MathCad environment. Based on the research results, conclusions were drawn on the possibility of using the proposed method in constructing stochastic models based on other models of epidemic spread, as well as for models of protecting an information system from the spread of a computer virus epidemic.

SIR model; information security; model of protected information system; properties preservation.

Введение. Наиболее важным фактором, влияющим на работоспособность и эффективность информационных систем в различных производственных отраслях, является их текущий уровень защищенности от различного вида угроз. Наибольший урон наносят компьютерные вирусы, которые попадая в информационную систему вызывают эпидемии, распространение которых носит случайный характер. Особенно остро этот вопрос возникает на критически важных объектах, где незамедлительное реагирование на распространение эпидемии позволило бы избежать серьезных последствий.

Анализ литературы [1–18] показывает, что для моделирования эпидемии компьютерных вирусов чаще всего используется биологическая модель распространения вирусов, так называемая SIR-модель, предложенная в 1927 г. У. Кермаком и А. МакКендриком [1]. Это связано с тем, что динамика распространения компьютерных вирусов очень схожа с динамикой распространения биологических вирусов. С точки зрения классической эпидемиологической модели распространения эпидемии предполагается, что каждый живой организм может находиться в одном из нескольких состояний и с течением времени это состояние изменяется [1, 2]. Количество таких состояний зависит от вида рассматриваемой модели.

В моделях распространения эпидемий компьютерных вирусов в качестве основных объектов рассматриваются элементы информационной системы и их текущее состояние [3–5].

Объекты информационной системы могут находиться в следующих состояниях (в зависимости от выбранной модели):

- ◆ не зараженные объекты или уязвимые;
- ◆ зараженные (инфицированные);
- ◆ вылеченные или обладающие иммунитетом;
- ◆ зараженные, но находящиеся в латентной стадии (т.е. в течении определенного периода времени не заражают другие объекты);

- ◆ помещенные на карантин;
- ◆ найденные зараженные.

На сегодняшний день существуют следующие виды математических моделей распространения компьютерных вирусов, разработанных на основе биологического подхода [3–5]:

- ◆ SI – Suspected (уязвимый)-Infected (зараженный),
- ◆ SIR – Suspected (уязвимый)-Infected (зараженный)-Recovered (вылеченный),
- ◆ SEIQR – Suspected (уязвимый)-Exposed (латентные)-Infected (зараженный)-Quarantined (карантин)-Recovered (вылеченный),
- ◆ PSIDR – Progressive Suspected (уязвимый)-Infected (зараженный)-Detected (найденные зараженные)-Recovered (вылеченный) – в данной модели поведение системы разбивается на два этапа.

Анализ литературы [5–18] показывает, что на основе SIR-модели и ее разновидностей построены различные детерминированные и стохастические модели распространения эпидемий. Выделим основные направления, в которых проводились исследования.

Авторы работы [6] рассматривают сравнительную характеристику существующих разновидностей SIR-модели и приводят их усовершенствованные версии применимые при распространении эпидемий компьютерных вирусов. В работе [7] рассматривается обобщенная модель распространения сетевых червей, с подробным рассмотрением этапов развития эпидемии и возможные решения проблемы на каждом из этапов. Рассмотрение SIR-модели с точки зрения имитационного моделирования предлагается в работе коллектива авторов [5]. По словам авторов это позволит управлять эпидемией, прогнозировать ее течение, подбирать методы противодействия. Автор работы [8] приводит сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными для четырех моделей, описывающих распространение вируса в сети при отсутствии возможности лечения зараженных хостов. На основе полученных моделей автором была создана модель, учитывающая возможность лечения зараженных хостов, а также проведен численный эксперимент, позволяющий проследить динамику численности всех групп, участвующих в эпидемиологическом процессе.

Стохастические модели на основе SIR рассматриваются в работах российских [9–10] и зарубежных авторов [11]. В [9] представлена комплексная модель динамики развития эпидемий вирусов в компьютерных сетях, созданная на основе учета их топологических свойств и механизмов распространения вирусов и основанная на методах теории перколяции. Автор рассматривает динамические процессы стохастического распространения в компьютерных сетях эволюционирующих вирусов при устаревании и запаздывании действия антивирусов.

Можно отметить ряд моделей, в которых учитываются случайные составляющие: модель с неопределенностью данных в начальный момент времени [11], эпидемические модели со случайным инфекционным периодом [12], модель, учитывающая случайное влияние среды на модель [13], модель с возмущениями, накладываемыми на параметры, входящие в модель [14].

Ряд авторов рассматривали стохастические модели эпидемии основываясь на марковских и полумарковских случайных средах [15–17]. В этих моделях в коэффициенты вносилась случайность, связанная с дискретным марковским процессом. Стохастические модели, основанные на теории систем СДУ, исследованы в [10, 18]. Сохранение численности популяции в работе [10] обеспечивается специфическим видом стохастической части и несколькими параметрами, в работе [18] – сохранение численности рассматривается как оптимизационная задача.

Несмотря на разнообразие представленных стохастических моделей, применение SIR-модели со случайными составляющими, чаще всего рассматривается на примерах биологических моделей. В области информационной безопасности таких исследований достаточно мало, что подтверждает актуальность выбранного исследования.

Реагирование на угрозу заражения математически можно сопоставить с введением некоторого компенсатора – функции управления, зависящей от состояния информационной системы в каждый момент времени. Как известно, управление производится с какой-либо целью. В качестве такой цели можно рассматривать сохранение наиболее существенных свойств, позволяющих информационной системе находиться в работающем состоянии.

Для дальнейших исследований возьмем за основу SIR-модель. Предлагаемый метод можно использовать и для построения стохастических моделей на основе моделей SEIQR и PSIDR. Использование только трех групп объектов информационной системы (на основе SIR) дает возможность использовать только 3 уравнения и избежать громоздкости при описании метода построения стохастической модели, а для построения моделей на основе других моделей требует большее число уравнений в системе, описывающей модель.

Постановка задачи. В структуре SIR-модели объекты информационной системы находятся в момент времени t образуют три группы, мигрируя между ними: зараженные $I(t)$, не зараженные $S(t)$, вылеченные объекты, обладающие иммунитетом $R(t)$.

Для данной модели предполагается, что общая численность объектов информационной системы – величина постоянная:

$$S(t) + I(t) + R(t) = 1,$$

где $S(t)$ – доля уязвимых объектов; $I(t)$ – доля зараженных объектов; $R(t)$ – доля невосприимчивых или вылеченных объектов, обладающих иммунитетом.

Пусть в начальный момент времени $t=0$ эти показатели таковы:

$$S(0) = S_0, \quad I(0) = I_0, \quad R(0) = R_0. \quad (1)$$

SIR-модель может быть описана с помощью системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} dS(t) = -\beta I(t)S(t)dt, \\ dI(t) = (\beta I(t)S(t) - \delta I(t))dt, \\ dR(t) = \delta I(t)dt, \end{cases} \quad (2)$$

с начальными условиями (1), β – параметр интенсивности заражения, δ – параметр интенсивности выздоровления (скорость «иммунизации»).

Внесем в модель (2) случайность, определяющую внешние воздействия, используя переход к системе стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) Ито. При этом необходимо построить такую математическую модель ИС, которая была бы способна оставаться в защищенном состоянии, не допуская распространения эпидемии компьютерных вирусов. Таким образом, будем строить математическую стохастическую модель информационной системы, защищенной от эпидемии компьютерных вирусов.

Стохастическая модель информационной системы, построенная на основе SIR-модели. Для проведения исследований требуется построить математическую стохастическую модель информационной системы, защищенной от заражения компьютерными вирусами, способную оставаться нечувствительной к внешнему воздействию. В качестве показателя защищенности системы будем рассматривать некоторое функциональное соотношение между переменными модели, сохраняющее постоянное значение.

Положим, что эпидемия объектов информационной системы может быть вызвана случайными внешними воздействиями, которые описываются с помощью случайного (винеровского) процесса $w(t)$ с некоторыми функциональными коэффициентами, зависящими, например, от времени или текущего состояния ИС.

В СДУ Ито случайность описывается винеровским процессом. Напомним его определение.

Винеровским процессом $w(t)$ называется случайный процесс, обладающий свойствами:

- 1) $w(0) = 0$;
- 2) математическое ожидание в любой момент времени равно нулю: $M[w(t)] = 0$;
- 3) приращения $\Delta w(t, s) = w(t) - w(s)$, $t > s$ – независимые случайные величины, распределение по нормальному закону $\mathcal{N}(0, |t - s|)$.

Тогда стохастическая модель информационной системы, подверженной атаке, построенная с использованием (2), будет определяться следующей системой СДУ Ито

$$\begin{cases} dS(t) = -\beta I(t)S(t)dt + r_1(t)dw(t), \\ dI(t) = (\beta I(t)S(t) - \delta I(t))dt + r_2(t)dw(t), \\ dR(t) = \delta I(t)dt + r_3(t)dw(t). \end{cases} \quad (3)$$

с начальными условиями

$$S(0) = S_0, \quad I(0) = I_0, \quad R(0) = R_0.$$

Однако в этом случае не выполняется важное свойство модели SIR, а именно, сохранение инварианта:

$$S(t) + I(t) + R(t) = 1.$$

Будем строить стохастическую модель, в которой это свойство будет обязательно сохраняться.

Построение модели стохастического трехмерного процесса с сохраняющимися инвариантами. Рассмотрим метод построения системы СДУ с начальными условиями, и имеющей заданные функции в качестве инвариантов.

Определение 1. [19]. Пусть $\mathbf{x}(t)$ – n -мерный ($n > 1$) случайный процесс, удовлетворяющий системе СДУ Ито

$$dx_i(t) = a_i(t, \mathbf{x}(t))dt + \sum_{k=1}^m b_{ik}(t, \mathbf{x}(t))dw_k(t), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \quad (4)$$

коэффициенты которого удовлетворяют условиям существования и единственности решения [20], и $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}_0)$ – его решение, удовлетворяющее заданному начальному условию. Неслучайная функция, непрерывно дифференцируемая по t и дважды непрерывно дифференцируемая по \mathbf{x} ($u(t, \mathbf{x}) \in C_{t, \mathbf{x}}^{1,2}$) называется первым интегралом системы СДУ, если она с вероятностью 1 на любой из траекторий решения системы (4) принимает постоянное значение, зависящее только от \mathbf{x}_0 : $u(t, \mathbf{x}(t, \mathbf{x}_0)) = u(0, \mathbf{x}_0)$.

Согласно [19], количество линейно-независимых первых интегралов для системы (4) не превышает $(n-1)$.

Не вдаваясь глубоко в теорию стохастических дифференциальных уравнений с инвариантами [21], покажем практическое ее применение на примере построения системы из трех СДУ, имеющей заданный набор первых интегралов, которые далее будем называть инвариантами.

Пусть система СДУ должна иметь функции $u(t, \mathbf{x})$, $v(t, \mathbf{x})$ в качестве первых интегралов: $u(t, \mathbf{x}(t, \mathbf{x}_0)) = u(0, \mathbf{x}_0)$ и $v(t, \mathbf{x}(t, \mathbf{x}_0)) = v(0, \mathbf{x}_0)$, где $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(0)$ – начальные условия.

Будем строить систему СДУ в матричном виде [21]:

$$d\mathbf{x}(t) = A_0(t, \mathbf{x}(t)) \cdot dt + B(t, \mathbf{x}(t))dw(t). \quad (5)$$

Определим коэффициенты-матрицы системы (5).

Пусть $\vec{e}_0, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ ортонормированный базис расширенного фазового пространства $[0, T) \times R^3$, в котором описывается динамика информационной системы.

1. Сначала строим матрицу $B(t, \mathbf{x}(t))$. Для этого рассмотрим матрицу

$$D_1(t, \mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ \frac{\partial u(t, \mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial u(t, \mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial u(t, \mathbf{x})}{\partial x_3} \\ \frac{\partial v(t, \mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial v(t, \mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial v(t, \mathbf{x})}{\partial x_3} \end{pmatrix} \quad (6)$$

и вычислим миноры $d_i(t, \mathbf{x})$, соответствующие элементам \vec{e}_i ($i = 0, 1, 2, 3$) матрицы (6), которые образуют вспомогательную матрицу столбец

$$D(t, \mathbf{x}) = (d_1(t, \mathbf{x}), d_2(t, \mathbf{x}), d_3(t, \mathbf{x}))^T. \quad (7)$$

Коэффициент $B(t, \mathbf{x})$ – множитель в стохастической части определяется по формуле:

$$B(t, \mathbf{x}(t)) = q(t, \mathbf{x}(t)) \cdot D(t, \mathbf{x}(t)) = (b_1(t, \mathbf{x}(t)), b_2(t, \mathbf{x}(t)), b_3(t, \mathbf{x}(t)))^T, \quad (8)$$

где $q(t, \mathbf{x})$ – некоторая произвольная функция.

2. Определяем коэффициент $A_0(t, \mathbf{x}(t))$. Рассмотрим матрицу

$$L(t, \mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \vec{e}_0 & \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ \frac{\partial u(t, \mathbf{x})}{\partial t} & \frac{\partial u(t, \mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial u(t, \mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial u(t, \mathbf{x})}{\partial x_3} \\ \frac{\partial v(t, \mathbf{x})}{\partial t} & \frac{\partial v(t, \mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial v(t, \mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial v(t, \mathbf{x})}{\partial x_3} \\ \frac{\partial h(t, \mathbf{x})}{\partial t} & \frac{\partial h(t, \mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial h(t, \mathbf{x})}{\partial x_2} & \frac{\partial h(t, \mathbf{x})}{\partial x_3} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

в которой $u(t, \mathbf{x}), v(t, \mathbf{x})$ – первые интегралы, $h(t, \mathbf{x})$ – произвольная дифференцируемая функция, независимая с функциями $u(t, \mathbf{x})$ и $v(t, \mathbf{x})$. Вычислим $M_i(t, \mathbf{x})$ – миноры, соответствующие элементам \vec{e}_i ($i = 0, 1, 2, 3$) матрицы (9). Последовательно проводим следующие вычисления

$$C_i(t, \mathbf{x}) = (-1)^i \cdot M_i(t, \mathbf{x}), \quad (i = 0, 1, 2, 3), \quad A_i(t, \mathbf{x}) = \frac{C_i(t, \mathbf{x})}{C_0(t, \mathbf{x})}, \quad (i = 1, 2, 3),$$

на основании которых строим вектор-столбец:

$$A(t, \mathbf{x}(t)) = (A_1(t, \mathbf{x}(t)), A_2(t, \mathbf{x}(t)), A_3(t, \mathbf{x}(t)))^T. \quad (10)$$

Строим еще один вспомогательный вектор-столбец по формуле $H(t, \mathbf{x}) = \left[\frac{\partial b_i(t, \mathbf{x})}{\partial x_j} \right]$. $B(t, \mathbf{x})$, где $\left[\frac{\partial b_i(t, \mathbf{x})}{\partial x_j} \right]$ – матрица, столбцы которой – частные производные компонент вектора (8) по переменным x_1, x_2, x_3 .

Коэффициент $A_0(t, \mathbf{x})$ системы (5), для которой функции $u(t, \mathbf{x}), v(t, \mathbf{x})$ являются первыми интегралами, определяется по формуле:

$$A_0(t, \mathbf{x}(t)) = A(t, \mathbf{x}(t)) + \frac{1}{2} H(t, \mathbf{x}(t)). \quad (11)$$

Система СДУ с начальными условиями $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ и инвариантами $u(t, \mathbf{x}(t, \mathbf{x}_0)) = u(0, \mathbf{x}_0), v(t, \mathbf{x}(t, \mathbf{x}_0)) = v(0, \mathbf{x}_0)$ построена.

Стохастическая модель информационной системы, защищенной от заражения компьютерными вирусами с вероятностью 1. Случайность вносит сильный вклад с поведение модели. Однако можно внести в систему (3) компенсатор (управление), который позволит сохранять с вероятностью 1 заданный показатель защищенности [21], описанный с помощью переменных модели. Поскольку этот показатель должен сохранять постоянное значение (быть инвариантом), то его можно рассматривать как первый интеграл системы СДУ [19].

Определение 2 [21, 22]. Программным управлением с вероятностью 1 (РСР1) будем называть такое управление в стохастической системе, которое с вероятностью, равной 1, сохраняет заданный инвариант, обеспечивая нечувствительность системы к случайным возмущениям.

Нечувствительность к внешнему воздействию будем сопоставлять с некоторыми инвариантами – функциями $u(t, S(t), I(t), R(t))$ и $v(t, S(t), I(t), R(t))$, аргументами которых являются фазовые координаты и время, и сохраняющие постоянное значение в любой момент времени t .

Пусть модель (3) можно записать в матричном виде

$$d\mathbf{x}(t) = K(t, \mathbf{x}(t)) \cdot dt + r(t, \mathbf{x}(t))dw(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \quad (12)$$

Для модели (12) обязательным условием является сохранение инварианта $u(t, \mathbf{x}(t)) = u(0, \mathbf{x}_0) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) - 1 = 0$. Если положить, что еще необходимо сохранение некоторого инварианта $v(t, \mathbf{x}(t)) = v(0, \mathbf{x}_0)$, то можно построить систему СДУ

$$d\mathbf{x}(t) = A_0(t, \mathbf{x}(t)) \cdot dt + B(t, \mathbf{x}(t))dw(t)$$

с коэффициентами $A_0(t, \mathbf{x}(t))$ и $B(t, \mathbf{x}(t))$, определяемыми по формулам (8) и (11), а затем, используя равенства

$$A_0(t, \mathbf{x}(t)) = K(t, \mathbf{x}(t)) + U_1(t, \mathbf{x}(t)), \quad B(t, \mathbf{x}(t)) = r(t, \mathbf{x}(t)) + U_2(t, \mathbf{x}(t)),$$

определить компенсаторы – функции управления $U_1(t, \mathbf{x}(t))$ и $U_2(t, \mathbf{x}(t))$. Если функции $r(t, \mathbf{x})$ первоначально неизвестны, то полагаем, что $B(t, \mathbf{x}(t)) = r(t, \mathbf{x}(t))$.

Положим: $\hat{y}(t) := U_1(t, S(t), I(t), R(t))$, $\hat{z}(t) := U_2(t, S(t), I(t), R(t))$, $r(t) := r(t, S(t), I(t), R(t))$. Тогда стохастическая модель защищенной от эпидемии вирусов информационной системы имеет вид:

$$d \begin{pmatrix} S(t) \\ I(t) \\ R(t) \end{pmatrix} = \left[\begin{pmatrix} -\beta I(t)S(t) \\ \beta I(t)S(t) - \delta I(t) \\ \delta I(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{y}_1(t) \\ \hat{y}_2(t) \\ \hat{y}_3(t) \end{pmatrix} \right] dt + \left[\begin{pmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ r_3(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{z}_1(t) \\ \hat{z}_2(t) \\ \hat{z}_3(t) \end{pmatrix} \right] dw(t) \quad (13)$$

с начальными условиями

$$S(0) = S_0, \quad I(0) = I_0, \quad R(0) = R_0,$$

в которой с вероятностью 1 сохраняются свойства:

$$u(t, S(t), I(t), R(t)) = S(t) + I(t) + R(t) - 1 \quad (14)$$

и

$$v(t, \mathbf{x}(t)) = v(0, \mathbf{x}_0) = Const \quad (15)$$

Таким образом, в модели (13) – (15), в отличие от модели (3), обязательно сохраняются инвариант (14) и какое-либо дополнительное свойство (15).

Пусть в модели (13) вектор коэффициентов $r(t, \mathbf{x})$ неизвестен. Рассмотрим пример построения стохастической модели SIR для защищенной ИС, в которой, кроме обязательного инварианта (14) будет еще сохраняться значение функции

$$v(t, S(t), I(t), R(t)) = S(t). \quad (16)$$

Так как для модели (13) располагаем определенным количеством объектов, то условие (14) является естественным ограничением при построении модели. Условие (16) позволит сохранить неизменность доли уязвимых объектов и не допустить их заражения, тем самым ликвидировать распространение эпидемии.

В начальный момент времени t_0 функции (14) и (16) принимают постоянное значение:

$$u(t_0, S(t_0), I(t_0), R(t_0)) = S(t) + I(t) + R(t) - 1 = C_1 = 0 \quad (17)$$

и

$$v(t, S(t), I(t), R(t)) = S(t) = C_2. \quad (18)$$

В качестве дополнительной возьмем, например, функцию $h(t, S(t), I(t), R(t)) = I(t) + e^t$, и, в качестве произвольной, функцию $q(t, S(t), I(t), R(t)) = S(t)$.

Для сохранения необходимых инвариантов $u(t, S(t), I(t), R(t))$ и $v(t, S(t), I(t), R(t))$ введем в систему уравнений функцию-компенсатор РСР1:

$$\hat{y}(t) := \hat{y}(t, S(t), I(t), R(t)).$$

Тогда система (13) примет вид:

$$\begin{cases} dS(t) = (-\beta I(t)S(t) + \hat{y}_1(t))dt + r_1(t)dw(t), \\ dI(t) = (\beta I(t)S(t) - \delta I(t) + \hat{y}_2(t))dt + r_2(t)dw(t), \\ dR(t) = (\delta I(t) + \hat{y}_3(t))dt + r_3(t)dw(t). \end{cases} \quad (19)$$

Следуя изложенному выше алгоритму, на основе первых интегралов можно построить систему СДУ с винеровскими возмущениями и РСР1 на основе модели эпидемии компьютерных вирусов, для которой функций (14) и (16) будут первыми интегралами (инвариантами), сохраняющие равенства (17) и (18).

Построенная система СДУ, и, соответственно, стохастическая модель защищенной ИС будет иметь вид:

$$\begin{cases} dS(t) = 0, \\ dI(t) = -e^t dt + S(t)dw(t), \\ dR(t) = e^t dt - S(t)dw(t). \end{cases} \quad (20)$$

Исходя из (19) и (20), определим функцию-компенсатор РСР1 $\hat{y}(t) := \hat{y}(t, S(t), I(t), R(t))$:

$$\begin{cases} \hat{y}_2(t) = -e^t - \beta I(t)S(t) + \delta I(t), \\ \hat{y}_3(t) = e^t - \delta I(t). \end{cases} \quad (21)$$

Таким образом, построенная система СДУ (20) представляет стохастическую модель информационной системы, защищенной от эпидемии компьютерных вирусов, в которой с вероятностью 1 сохраняются инварианты (14) и (16).

Для анализа построенной модели проведем численное моделирование решений системы СДУ (20) при различных начальных условиях (табл. 1). Будем рассматривать случаи, когда в начальный момент времени доли уязвимых объектов и зараженных одинакова, доля уязвимых значительно превышает долю зараженных и доля зараженных значительно превышает долю уязвимых.

На рис. 1 представлены результаты численного моделирования решений системы СДУ (20), где для любого из вариантов решения сохраняются значения функций $u(t, S(t), I(t), R(t)) = 0$ (т. е. $LX_i = (X_i)_0 + (X_i)_1 + (X_i)_2 - 1 = 0$) и $v(t, S(t), I(t), R(t)) = S(t)$ (т. е. $VX_i = (X_i)_0 = const$).

Таблица 1

Начальные условия для численного моделирования модели (20)

Исследуемый показатель	Обозначения на рис. 1	Начальные условия		
		Вариант 1 (рис. 1,а)	Вариант 2 (рис. 1,б)	Вариант 3 (рис. 1,в)
Доля уязвимых объектов, S_0	$(X_i)_0$	0,5	0,3	0,7
Доля зараженных объектов, I_0	$(X_i)_1$	0,5	0,7	0,3
Доля невосприимчивых или вычтенных объектов, R_0	$(X_i)_2$	0	0	0

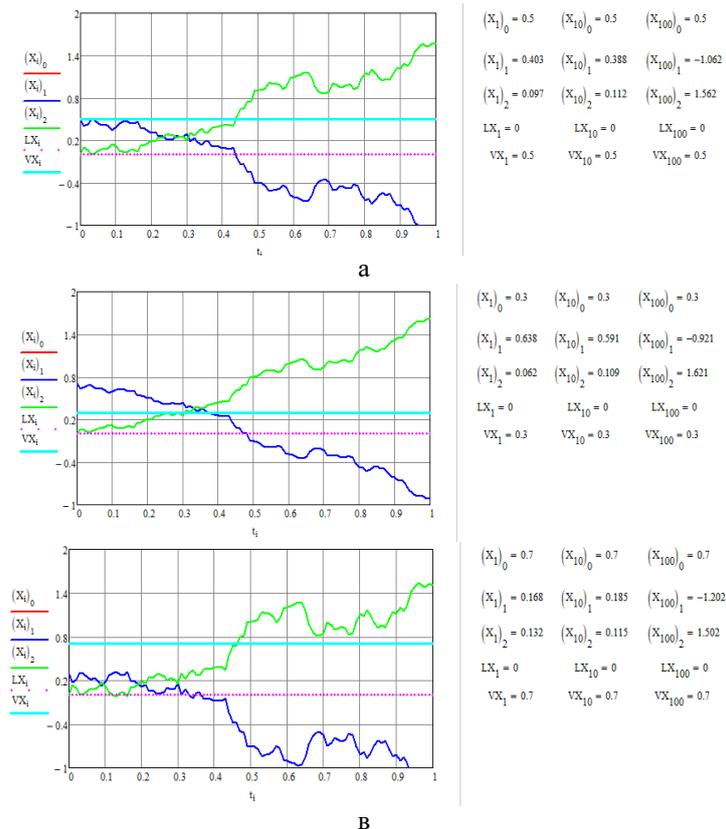


Рис. 1. Численное решение системы СДУ (20) с различными начальными условиями: а – вариант 1, б – вариант 2, в – вариант 3 (LX_i и VX_i – первые интегралы соответственно $u(t, S(t), I(t), R(t))$ и $v(t, S(t), I(t), R(t))$)

Анализируя результаты моделирования, представленные на рис. 1, можно сделать следующий вывод: при условии сохранения постоянного значения функций $u(t, S(t), I(t), R(t)) = 0$, $v(t, S(t), I(t), R(t)) = S(t)$ и начальных значений доли зараженных компьютеров их количество практически не увеличиваются и с течением времени уменьшаются.

Таким образом, была построена стохастическая математическая модель информационной системы, защищенная от заражения компьютерными вирусами. Полученная модель позволяет не допустить распространения эпидемии компьютерных вирусов и устранить негативное воздействие на информационную систему.

Детерминированная модель защищенной информационной системы. Аналогичным образом, воспользовавшись алгоритмом, предложенным выше, можно построить детерминированную модель ИС, защищенной от заражения компьютерными вирусами.

Чтобы значения функций $u(t, S(t), I(t), R(t))$ и $v(t, S(t), I(t), R(t))$ оставались неизменными, в модель (2) внесем управление, подобное программному управлению с вероятностью 1 [23], которое позволит сохранять значение инвариантов: $\hat{y}(t) := \hat{y}(t, S(t), I(t), R(t))$.

Тогда SIR-модель защищенной ИС примет вид:

$$\begin{cases} dS(t) = (-\beta I(t)S(t) + \hat{y}_1(t))dt, \\ dI(t) = (\beta I(t)S(t) - \delta I(t) + \hat{y}_2(t))dt, \\ dR(t) = (\delta I(t) + \hat{y}_3(t))dt. \end{cases} \quad (22)$$

При этом выполнены условия (17) и (18).

Для определения вектора функций управления $\hat{y}(t, S(t), I(t), R(t))$, сохраняющего заданные инварианты, будем следовать алгоритму, предложенному выше. Отличие будет состоять только в том, что компоненты, соответствующие стохастическому слагаемому, отсутствуют, соответственно, отсутствует и их влияние на коэффициент при dt . Т.е. будем строить такую систему ДУ в матричном виде:

Соответствующая модель защищенной ИС в матричной форме имеет вид:

$$dx(t) = A(t, x(t)) \cdot dt,$$

где $A(t, x(t))$ определяется по формуле (10).

Приведем пример построения детерминированной SIR-модели ИС, в которой функции (14) и (16) определяют инварианты, обеспечивающие защищенность ИС от эпидемии вирусов. Построенная система ДУ имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = 0, \\ \frac{dI(t)}{dt} = -e^t, \\ \frac{dR(t)}{dt} = e^t. \end{cases} \quad (23)$$

Исходя из (22) и (23), определим управление, обеспечивающее инварианты: $\hat{y}(t) := \hat{y}(t, S(t), I(t), R(t))$:

$$\begin{cases} \hat{y}_2(t) = -e^t - \beta I(t)S(t) + \delta I(t), \\ \hat{y}_3(t) = e^t - \delta I(t), \end{cases} \quad (24)$$

Таким образом, детерминированная модель информационной системы, защищенной от распространения эпидемии компьютерных вирусов, имеет вид (23). Функция управления $\hat{y}(t, S(t), I(t), R(t))$, определяемая системой (24), гарантирует сохранение инвариантов $u(t, S(t), I(t), R(t))$ и $v(t, S(t), I(t), R(t))$. Для анализа построенной модели проведем построение численного решения системы дифференциальных уравнений (23), при различных начальных условиях (табл. 2).

На рис. 2 представлены результаты численного решения системы СДУ (23), где для любого из вариантов решения сохраняются значения функций $u(t, S(t), I(t), R(t)) = 0$ (т.е. $LX_i = (X_i)_0 + (X_i)_1 + (X_i)_2 - 1 = 0$) и $v(t, S(t), I(t), R(t)) = S(t)$ (т.е. $VX_i = (X_i)_0 = const$).

Анализируя результаты численного решения, представленные на рис. 2 можно сделать следующий вывод: что при условии сохранения постоянного значения функций $u(t, S(t), I(t), R(t)) = 0$, $v(t, S(t), I(t), R(t))$ и начальных значений доли зараженных компьютеров развитие эпидемии компьютерных вирусов не возникает, т.е. доля зараженных компьютеров с течением времени уменьшается.

Таким образом, построена детерминированная математическая модель информационной системы, защищенная от распространения эпидемии компьютерных вирусов [24].

Таблица 2

Начальные условия для построения численного решения системы (23)

Исследуемый показатель	Обозначения (рис. 5)	Начальные условия		
		Вариант 1 (рис. 5,а)	Вариант 2 (рис. 5,б)	Вариант 3 (рис. 5,в)
Доля уязвимых объектов, S_0	$(X_i)_0$	0,5	0.3	0.7
Доля зараженных объектов, I_0	$(X_i)_1$	0,5	0.7	0.3
Доля невосприимчивых или вылеченных объектов, R_0	$(X_i)_2$	0	0	0

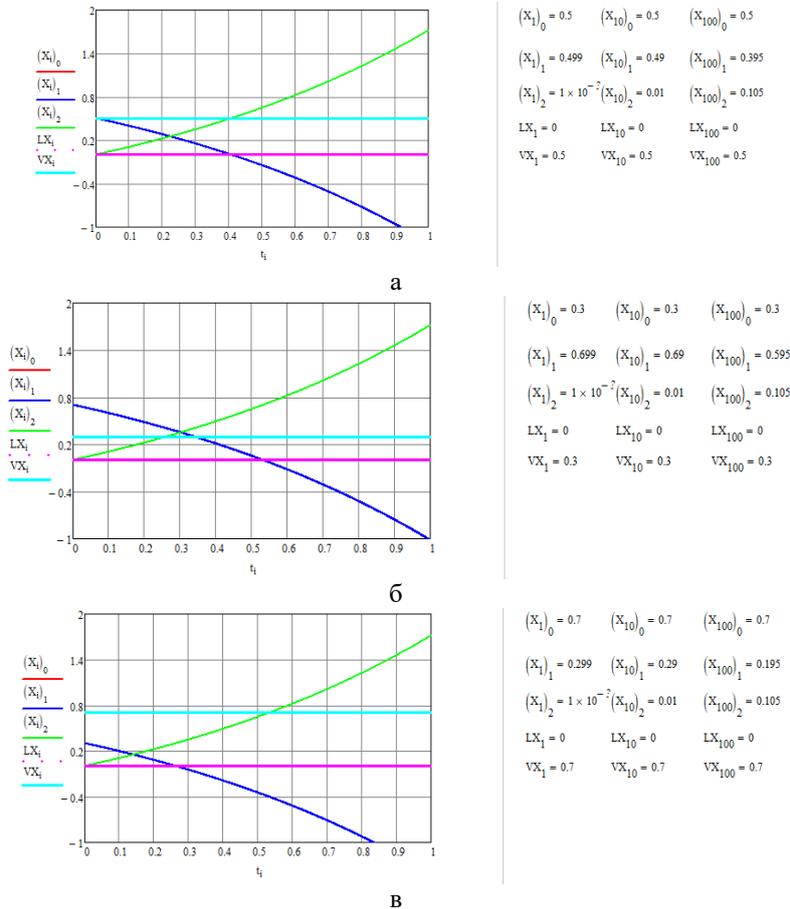


Рис. 2. Численное решение системы (23) с различными начальными условиями: а – вариант 1, б – вариант 2, в – вариант 3 (LX_i и VX_i – первые интегралы соответственно $u(t, S(t), I(t), R(t))$ и $v(t, S(t), I(t), R(t))$)

Заключение. Внесение в классическую модель SIR стохастического слагаемого позволяет математически описать случайное влияние, вызывающее заражение информационной системы компьютерными вирусами. Показана возможность построения стохастической модели информационной системы, защищенной от распространения эпидемии компьютерных вирусов. Построены две модели: стохастическая инфицирование вирусами которой происходит непрерывно, и детерминированная, в которой вирус находится в системе.

Особенность предлагаемых моделей состоит в том, что в системе сохраняются инварианты, связанные со свойствами, которые обеспечивают защищенность информационной системы. Анализ полученных моделей показал возможность их применения для защиты ИС от распространения эпидемии компьютерных вирусов.

Отметим, что предложенный метод может быть применен к построения стохастической модели, защищенной от эпидемии компьютерных вирусов, и на основе других моделей распространения эпидемии.

Таким образом, предложены методы построения стохастической и детерминированной моделей ИС, защищенной от распространения эпидемии компьютерных вирусов на основе модели SIR, позволяющие информационной системе оставаться в защищенном состоянии.

Финансирование. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ (проект № 22/23-К), МТУСИ (ФУМО ИБ) от 30.05.2023.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kermack W.O., McKendrick A.* Contributions to the Mathematical Theory of Epidemics // Proc. Royal Society. – 1927. – A 115. – P. 700-721.
2. *Романюха А.А.* Математические модели в иммунологии и эпидемиологии инфекционных заболеваний. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 256 с.
3. *Захарченко А.* Черводинамика: причины и следствия // Защита информации. Конфидент. – 2004. – № 2. – С. 50-55.
4. *Котенко И.В., Воронцов В.В.* Аналитические модели распространения сетевых червей // Тр. СПИИРАН. – СПб.: Наука, 2007. – № 4.
5. *Минаев В.А., Сычев М.П., Вайц Е.В., Киракосян А.Э.* Имитационное моделирование эпидемии компьютерных вирусов // Вестник Российского нового университета. – 2019. – № 3. – С. 3-12.
6. *Давыдов В.В., Семенов С.Г.* Математическая модель распространения компьютерных вирусов в гетерогенных компьютерных сетях автоматизированных систем управления технологическим процессом // Вестник НТУ ХПИ. – 2012. – № 38. – С. 163-171.
7. *Качалин А.И.* Моделирование процесса распространения сетевых червей для оптимизации защиты корпоративной сети // Искусственный интеллект. – 2006. – № 2. – С. 84-87.
8. *Еремеева Н.И.* Построение модели распространения вируса в компьютерной сети на основе сравнения результатов моделирования с эмпирическими данными // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. – 2022. – № 4. – С. 39-52.
9. *Лесько С.А., Алешкин А.С., Филатов В.В.* Стохастические и перколяционные модели динамики блокировки вычислительных сетей при распространении эпидемий эволюционирующих компьютерных вирусов // Российский технологический журнал. – 2019. – Т. 7, № 3. – С. 7-27.
10. *Борисенко А.Б., Немтинов В.А., Борисенко А.А.* Применение стохастической SIR-модели для моделирования эпидемического процесса // Вестник Тамбовского ГТУ. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 41-51.
11. *Almbrok Hussin Alsonosi Omar, Yahya Abu Hasan,* Numerical simulations of an SIR epidemic model with random initial states // ScienceAsia. – 2013. – 39S. – P. 42-47.
12. *Germán Riaño.* Epidemic Models with Random Infectious Period // medRxiv. – 2020.05.15.20103465.
13. *Caraballo T., Colucci R.* A comparison between random and stochastic modeling for a SIR model // Commun. Pure Appl. – 2017. – A 16. – P. 151-162.
14. *Qingshan Yang, Xuerong Mao.* Stochastic dynamics of SIRS epidemic models with random perturbation // Mathematical Biosciences and Engineering. – 2014. – Vol. 11, Issue 4. – P. 1003-1025.
15. *Swishchuk A., Svishchuk M.* Endemic SIR model in random media with applications // Biom Biostat Int J. – 2018. – Vol. 7, Issue 2. – P. 115-121.
16. *Xue X.* Phase transition for SIR model with random transition rates on complete graphs // Frontiers of Mathematics in China. – 2018. – A 13. – P. 667-690.
17. *Bartoszek K., Bartoszek W., Krzemiński M.* Simple SIR models with Markovian control // Jpn J Stat Data Sci. – 2021. – A 4. – P. 731-762.

18. *Yoon-Gu Hwang, Hee-Dae Kwon, Jeehyun Lee.* Optimal Control Problem of an SIR Model with Random Inputs Based on a Generalized Polynomial Chaos Approach // *International Journal of Numerical Analysis and Modeling.* – 2022. – Vol. 19. Issue 2-3. – P. 255-274.
19. *Дубко В.А.* Первый интеграл системы стохастических дифференциальных уравнений. – Киев: Институт математики АН УССР, 1978. – 21 с.
20. *Гихман И.И., Скороход А.В.* Стохастические дифференциальные уравнения. – Киев: Наук. Думка, 1968. – 354 с.
21. *Карачанска Е.В.* Интегральные инварианты стохастических систем и программное управление с вероятностью 1. – Хабаровск: Изд-во Тихокеан. гос. ун-та, 2015. – 149 с.
22. *Чалых Е.В.* Построение множества программных управлений с вероятностью 1 для одного класса стохастических систем // *Автоматика и телемеханика.* – 2009. – Т. 70, № 8. – С. 110-122.
23. *Карачанская Е.В.* Моделирование систем дифференциальных уравнений с динамическими инвариантами // *Математическое моделирование и численные методы.* – 2019. – № 1. – С. 98-117.
24. *Рыбкина О.В.* Построение детерминированной и стохастической математических моделей защиты информационной системы // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы.* – 2024. – № 3. – С. 30-39.

REFERENCES

1. *Kermack W.O., McKendrick A.* Contributions to the Mathematical Theory of Epidemics, *Proc. Royal Society*, 1927, A 115, pp. 700-721.
2. *Romanyukha A.A.* Matematicheskie modeli v immunologii i epidemiologii infektsionnykh zabolevaniy [Mathematical models in immunology and epidemiology of infectious diseases]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2015, 256 p.
3. *Zakharchenko A.* Chervodynamika: prichiny i sledstviya [Chervodynamics: causes and consequences], *Zashchita informatsii. Konfident* [Information Security. Konfident], 2004, No. 2, pp. 50-55.
4. *Kotenko I.V., Vorontsov V.V.* Analiticheskie modeli rasprostraneniya setevykh chervy [Analytical Models of Network Worm Propagation], *Tr. SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings]. Saint Petersburg: Nauka, 2007, No. 4.
5. *Minaev V.A., Sychev M.P., Vayts E.V., Kirakosyan A.E.* Imitatsionnoe modelirovanie epidemii komp'yuternykh virusov [Simulation modeling of computer virus epidemics], *Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta* [Bulletin of the Russian New University], 2019, No. 3, pp. 3-12.
6. *Davydov V.V., Semenov S.G.* Matematicheskaya model' rasprostraneniya komp'yuternykh virusov v geterogennykh komp'yuternykh setyakh avtomatizirovannykh sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessom [Mathematical model of computer virus propagation in heterogeneous computer networks of automated process control systems], *Vestnik NTU KhPI* [Bulletin of NTU "KhPI"], 2012, No. 38, pp. 163-171.
7. *Kachalin A.I.* Modelirovanie protsessa rasprostraneniya setevykh chervy dlya optimizatsii zashchity korporativnoy seti [Modeling the process of network worm propagation for optimizing corporate network protection], *Iskusstvennyy intellekt* [Artificial Intelligence], 2006, No. 2, pp. 84-87.
8. *Eremeeva N.I.* Postroenie modeli rasprostraneniya virusa v komp'yuternoy seti na osnove sravneniya rezul'tatov modelirovaniya s empiricheskimi dannymi [Building a virus spread model in a computer network based on comparing simulation results with empirical data], *Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya matematika* [Bulletin of Tver State University. Series: Applied Mathematics], 2022, No. 4, pp. 39-52.
9. *Les'ko S.A., Aleshkin A.S., Filatov V.V.* Stokhasticheskie i perkolyatsionnye modeli dinamiki blokirovki vychislitel'nykh setey pri rasprostranении epidemiy evolyutsioniruyushchikh komp'yuternykh virusov [Stochastic and Percolation Models of Computational Network Lockdown Dynamics During the Spread of Evolving Computer Virus Epidemics], *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal], 2019, Vol. 7, No. 3, pp. 7-27.
10. *Borisenko A.B., Nemtinov V.A., Borisenko A.A.* Primenenie stokhasticheskoy SIR-modeli dlya modelirovaniya epidemicheskogo protsessa [Application of the Stochastic SIR Model for Epidemic Process Modeling], *Vestnik Tambovskogo GTU* [Transactions TSTU], 2023, Vol. 29, No. 1, pp. 41-51.
11. *Almbrok Hussin Alsonosi Omar, Yahya Abu Hasan,* Numerical simulations of an SIR epidemic model with random initial states, *ScienceAsia*, 2013, 39S, pp. 42-47.
12. *Germán Riaño.* Epidemic Models with Random Infectious Period, *medRxiv*. 2020.05.15.20103465.
13. *Caraballo T., Colucci R.* A comparison between random and stochastic modeling for a SIR model, *Commun. Pure Appl.*, 2017, A 16, pp. 151-162.
14. *Qingshan Yang, Xuerong Mao.* Stochastic dynamics of SIRS epidemic models with random perturbation, *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2014, Vol. 11, Issue 4, pp. 1003-1025.
15. *Swishchuk A., Svishchuk M.* Endemic SIR model in random media with applications, *Biom Biostat Int J.*, 2018, Vol. 7, Issue 2, pp. 115-121.

16. Xue X. Phase transition for SIR model with random transition rates on complete graphs, *Frontiers of Mathematics in China*, 2018, A 13, pp. 667-690.
17. Bartoszek K., Bartoszek W., Krzemiński M. Simple SIR models with Markovian control, *Jpn J Stat Data Sci.*, 2021, A 4, pp. 731-762.
18. Yoon-Gu Hwang, Hee-Dae Kwon, Jeehyun Lee. Optimal Control Problem of an SIR Model with Random Inputs Based on a Generalized Polynomial Chaos Approach, *International Journal of Numerical Analysis and Modeling*, 2022, Vol. 19. Issue 2-3, pp. 255-274.
19. Dubko V.A. Pervyy integral sistemy stokhasticheskikh differentsial'nykh uravneniy [The first integral of the system of stochastic differential equations]. Kiev: Institut matematiki AN USSR, 1978, 21 p.
20. Gikhman I.I., Skorokhod A.V. Stokhasticheskie differentsial'nye uravneniya [Stochastic differential equations]. Kiev: Nauk. Dumka, 1968, 354 p.
21. Karachanska E.V. Integral'nye invarianty stokhasticheskikh sistem i programmnoe upravlenie s veroyatnost'yu 1 [Integral invariants of stochastic systems and program control with probability 1]. Khabarovsk: Izd-vo Tikhokean. gos. un-ta, 2015, 149 p.
22. Chalykh E.V. Postroenie mnozhestva programmnykh upravleniy s veroyatnost'yu 1 dlya odnogo klassa stokhasticheskikh sistem [Constructing the set of program controls with probability 1 for one class of stochastic systems], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2009, Vol. 70, No. 8, pp. 110-122.
23. Karachanskaya E.V. Modelirovanie sistem differentsial'nykh uravneniy s dinamicheskimi invariantami [Modeling of systems of differential equations with dynamic invariants], *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody* [Mathematical modeling and numerical methods], 2019, No. 1, pp. 98-117.
24. Rybkina O.V. Postroenie determinirovannoy i stokhasticheskoy matematicheskikh modeley zashchity informatsionnoy sistemy [Construction of deterministic and stochastic mathematical models of information system protection], *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of information security. Computer systems], 2024, No. 3, pp. 30-39.

Карачанская Елена Викторовна – Дальневосточный государственный университет путей сообщения; e-mail: elena_chal@mail.ru; г. Хабаровск, Россия; д.ф.-м.н., профессор кафедры «Информационные технологии и системы».

Рыбкина Олеся Викторовна – Дальневосточный государственный университет путей сообщения; e-mail: ribkina_ol@mail.ru; г. Хабаровск, Россия; старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и системы».

Karachanskaya Elena Viktorovna – Far Eastern State Transport University; e-mail: elena_chal@mail.ru; Khabarovsk, Russia; dr. of phys.-math. sc.; professor of the Department «Information Technologies and Systems».

Rybkina Olesya Viktorovna – Far Eastern State Transport University; e-mail: ribkina_ol@mail.ru; Khabarovsk, Russia; senior lecturer of the Department of «Information Technologies and Systems».

УДК 303.732.4

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-157-178

А.И. Гусева, Р.М. Романов

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ, ОСНОВАННЫЙ НА КОГНИТИВНОМ НЕЧЕТКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ И РЕГРЕССИОННОМ АНАЛИЗЕ

Актуальность исследования определяется низкой эффективностью традиционных методов прогнозирования временных рядов в условиях высокой неопределённости и ограниченного объёма данных, характерных для слабо формализованных систем. Цель работы заключается в разработке и обосновании метода прогнозирования временных рядов на основе гибридного подхода, объединяющего когнитивное нечеткое моделирование, регрессионный анализ и метод аналитических сетей. В рамках исследования проведён системный обзор и сравнительный анализ существующих методов прогнозирования, включая подходы на основе нечеткой логики, нейросетевого и когнитивного моделирования, ансамблевых и гибридных методов, и выявлены их ограничения при работе с малыми выборками, нелинейными зависимостями и неопределённостью. Разработанный ме-

тод включает: построение нечетких когнитивных карт, дефаззификацию лингвистических оценок, кластеризацию факторов, применение метода аналитических сетей для определения приоритетов и формирование взвешенной регрессионной модели. Модель проходит статистическую валидацию по метрикам MAE, RMSE, MAPE и R^2 , а также проверку предпосылок регрессионного анализа, включая тесты на мультиколлинеарность и автокорреляцию. Применение метода обеспечило снижение RMSE с 0,38 до 0,22, MAE с 0,30 до 0,18 и MAPE с 11,65 % до 7,12 %, что подтверждает повышение точности и устойчивости прогнозов при ограниченном объеме данных по сравнению с классической многофакторной регрессией. Новизна разработанного метода заключается в интеграции когнитивного моделирования, регрессионного анализа и метода аналитических сетей, при которой преимущества каждого компонента компенсируют их индивидуальные ограничения, обеспечивая более точное и устойчивое прогнозирование в условиях неопределенности исследуемой системы. Практическая значимость работы состоит в возможности применения предложенного метода для поддержки принятия решений и повышения обоснованности прогнозов в различных предметных областях и ситуациях, где имеется ограниченный объем наблюдений, а существенную роль играют экспертные оценки, а также сложная структура причинно-следственных связей между показателями во времени.

Прогнозирование временных рядов; когнитивное моделирование; нечеткие когнитивные карты; регрессионный анализ; гибридный подход; экспертные оценки; аналитические сети; управление в условиях неопределенности; газовый бизнес.

A.I. Guseva, R.M. Romanov

A TIME SERIES FORECASTING METHOD BASED ON COGNITIVE FUZZY MODELING AND REGRESSION ANALYSIS

The relevance of the study stems from the low effectiveness of traditional time series forecasting methods under conditions of high uncertainty and limited data, which are typical of weakly formalized systems. The aim of the work is to develop and substantiate a time series forecasting method based on a hybrid approach that integrates cognitive fuzzy modelling, regression analysis, and the analytic network process. Within the study, a systematic review and comparative analysis of existing forecasting methods was carried out, including approaches based on fuzzy logic, neural network and cognitive modelling, as well as ensemble and hybrid methods, and their limitations were identified when dealing with small samples, nonlinear dependencies, and uncertainty. The proposed method includes: the construction of fuzzy cognitive maps, defuzzification of linguistic assessments, clustering of factors, application of the analytic network process to determine priorities, and the formation of a weighted regression model. The model undergoes statistical validation using the MAE, RMSE, MAPE, and R^2 metrics, as well as diagnostic checks of the assumptions underlying regression analysis, including tests for multicollinearity and autocorrelation. Application of the method reduced RMSE from 0.38 to 0.22, MAE from 0.30 to 0.18, and MAPE from 11.65 % to 7.12 %, thereby confirming an improvement in the accuracy and robustness of forecasts under limited data compared with classical multiple regression. The novelty of the proposed method lies in the integration of cognitive modelling, regression analysis, and the analytic network process, whereby the strengths of each component compensate for their individual limitations, providing more accurate and robust forecasting under the uncertainty inherent in the system under study. The practical significance of the work consists in the possibility of applying the proposed method to support decision-making and to enhance the validity of forecasts in various subject domains and situations characterized by a limited number of observations, a substantial role of expert judgments, and a complex structure of causal relationships between indicators over time.

Time series forecasting; cognitive modeling; fuzzy cognitive maps; regression analysis; hybrid approach; expert assessments; analytic network process; decision-making under uncertainty; gas industry.

Введение. Прогнозирование в различных областях осуществляется на протяжении десятилетий как в науке, так и в промышленности: при исследовании временных рядов, научно-технологического прогресса, социально-экономического состояния общества, в медицине и здравоохранении, сельском хозяйстве и логистике, управлении и маркетинге и т.д. Сама задача прогнозирования временных рядов является классической задачей машинного обучения и относится к типу «обучение с учителем» [1].

Накопление огромных объемов данных расширяет возможности моделей машинного обучения, однако степень нелинейности, зашумленности и неопределенности данных растёт, а кризисные явления и политико-экономическая нестабильность в мировом масштабе существенно затрудняют прогнозирование на основе только исторических вре-

менных рядов [2]. Важно отметить, что статистические и регрессионные модели могут некорректно определять значимость факторов, что приводит к существенным искажениям в прогнозах. Особенно ярко данная проблема проявляется при анализе малых выборок с резкими изменениями в данных, когда модель может ошибочно идентифицировать причинно-следственные связи. Это подтверждается исследованиями в области эконометрического моделирования, где показано, что в условиях нестабильности и резких изменений в данных классические регрессионные модели часто присваивают высокую значимость несущественным факторам, что ведёт к снижению точности прогнозов [3]. В таких ситуациях на первый план выходят методы, основанные на экспертных оценках, а также модели, способные эффективно работать на малых выборках. Более того, даже при наличии достаточного объема данных, учет экспертного мнения остается критически важным для корректной интерпретации результатов и валидации прогнозных моделей в сложных и нестабильных системах. Одним из перспективных инструментов являются нечеткие когнитивные карты (НКК): они описывают проблемную область в виде сети факторов со связями «причина–следствие» и позволяют на основе экспертных высказываний (например, «усиление фактора А сильно увеличивает В») моделировать развитие ситуации и прогнозировать изменение системы по выбранным входным воздействиям [4]. Преимущество НКК состоит в возможности включения новых факторов, по которым отсутствует достаточный объём наблюдений, но которые оказывают косвенное или прямое воздействие на уже существующие элементы модели. Такое причинно-следственное влияние способно не только скорректировать, но и существенно трансформировать существующие прогнозные модели, изменяя структуру их взаимосвязей и результаты расчётов. В финансово-экономическом контексте это способствует более полному учёту последствий валютных колебаний и рыночной турбулентности, повышая уровень системности организации и качество оценок возможных состояний.

Учитывая вышеизложенные сложности прогнозирования, особую актуальность приобретает разработка комбинированных подходов к прогнозированию финансово-экономических показателей.

В качестве практической области применения комбинированных подходов в данной статье рассматривается топливно-энергетический комплекс РФ (ТЭК). Топливо-энергетический комплекс, как объект исследования и управления, представляет собой сложную систему, характеризующуюся высокой динамичностью и многоаспектностью протекающих в ней процессов. Его состояние определяется не только экономическими, но и геополитическими, технологическими и социальными факторами. Именно специфика ТЭК, характеризующаяся высокой степенью неопределённости и многофакторности, делает особенно актуальным разработку методов прогнозирования. Многие элементы и взаимосвязи данной системы, особенно в контексте энергетического перехода и глобальной нестабильности, не до конца изучены и могут описываться преимущественно качественными характеристиками. Часто отсутствует достаточная количественная информация для формализованного описания поведения системы в изменяющихся условиях. Процессы, протекающие в ТЭК, изменчивы во времени и описываются сложными нелинейными зависимостями, что позволяет классифицировать его как сложную слабо формализованную социально-экономическую систему. Исходя из вышеизложенного анализа, становится очевидной необходимость разработки методов прогнозирования в условиях ограниченной информации. Таким образом, целью настоящего исследования является разработка метода прогнозирования в условиях малых выборок и неопределённости, адаптированного к специфике ТЭК.

Основная часть работы

1. Описание решаемой задачи

Постановка задачи исследования связана с управлением слабо формализованной системой, обладающей высокой степенью неопределённости и множеством взаимосвязанных внутренних и внешних факторов. Такая система имеет сложную структуру взаимодействий, что требует разработки комплексных подходов для её моделирования и прогнозирования поведения. Исследуемая система формализуется как упорядоченная пара $S = \langle M, R \rangle$, где $M = \{M_C, M_B, M_U, M_Q, M_O\}$ представляет собой множество моделей, от-

ражающих наше представление о системе (включая когнитивную, поведенческую, управленческую, качественную и экспертную), а $R \subseteq M \times M$ – отношение между этими компонентами. Когнитивная модель M_c описывается ориентированным графом $G = \langle V, E \rangle$, в котором узлы V соответствуют контролируемым и неконтролируемым факторам, а дуги E характеризуются весами $w_{ij} \in [-1, 1]$, отражающими силу причинно-следственных связей. Для моделирования поведения системы используется регрессионная модель M_B , управляющая модель M_U предназначена для формирования воздействий на систему, а модель оценки качества M_Q обеспечивает оценку точности и адекватности результатов с использованием таких метрик, как $MAE, MAPE, RMSE, R^2$ а также тестов на мультиколлинеарность и автокорреляцию. Компонент M_O реализует метод аналитических сетей для оценки относительной важности факторов.

Основную сложность при работе с данной системой вызывает ограниченный объём доступных данных, что накладывает существенные ограничения на построение моделей и проведение статистических оценок. Метод аналитических сетей используется для компенсации недостатка данных путём интеграции экспертных знаний и формирования весов факторов, которые далее используются в прогностической модели. Прогнозирование выполняется с помощью регрессионной модели:

$$\hat{Y}(t) = \beta_0 + \sum_{i=0}^n \beta_i (w_i \cdot X_i(t, u_t)) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $\hat{Y}(t)$ – прогнозируемое значение в момент времени t , β_0 и β_i – параметры регрессии, n – число факторов, $X_i(t, u_t)$ – значение фактора в момент времени t , зависящее от управляющего воздействия u_t , $\varepsilon(t)$ – случайная ошибка.

В рамках рассматриваемой задачи рассматривается целевая переменная u_t , вектор факторных переменных $x_t = (x_{1t}, \dots, x_{12t})$ и вектор управляющих воздействий u_t . В соответствии с постановкой задачи x_t раскладывается на эндогенную компоненту $x_t^{(endo)}$, описывающую внутренние производственные и финансовые показатели исследуемой подсистемы (газового бизнеса), и экзогенную компоненту $x_t^{(exo)}$, представляющую внешние рыночные, макроэкономические и регуляторной среды. Управляющие переменные u_t формируются как подмножество эндогенных показателей, которые могут изменяться в результате управленческих решений и входят в модель неявно через зависимость $x_t^{(endo)} = f(x_t^{(exo)}, u_t)$. Вместе с тем, с учётом системообразующей роли газового сектора в российской экономике, изменения его производственных и финансовых показателей могут оказывать опосредованное влияние на макроэкономические параметры, включая обменный курс рубля. Предлагаемая модель ориентирована на количественную оценку этого влияния. Конкретный состав эндогенных, экзогенных и управляющих переменных уточняется в разделе «Результаты и их обсуждение».

Цель управления заключается в минимизации функционала потерь:

$$\min_{u \in U^T} \sum_t^T w_t (Y_t - \hat{Y}_t(u_t))^2, \quad (2)$$

где w_t – весовой коэффициент, Y_t – наблюдаемое значение, а \hat{Y}_t – прогнозируемое. Ограниченная выборка данных требует особого подхода к калибровке моделей, включая проверку их устойчивости и адекватности на небольших объёмах информации. Таким образом, основной задачей является создание метода управления слабо формализованной системой в условиях недостаточной выборки данных, которая обеспечивала бы стабильность и точность прогнозов.

Объект и предмет исследования:

Объектом исследования является топливно-энергетический комплекс как сложная слабо формализованная система, характеризующаяся множеством взаимодействующих факторов, нелинейными зависимостями и высокой степенью внешней и внутренней неопределённости. Предметом исследования выступают методы прогнозирования, ориентированные на решение задач управления слабо формализованными системами через прогнозирование.

Гипотеза исследования:

Использование гибридного метода, сочетающего методы аналитических сетей, регрессионного анализа и когнитивного моделирования, позволит значительно повысить точность прогнозирования и эффективность управления слабо формализованными системами. Апробация предложенного подхода на исторических данных продемонстрирует его превосходство над традиционными отраслевыми моделями, что выражается в снижении ошибок прогнозирования, таких как *RMSE*, *MAE* и *MAPE*.

Задачи исследования:

1. Провести системный анализ существующих методов прогнозирования временных рядов, включая подходы на основе нечеткой логики, нейросетевого моделирования, когнитивного моделирования, метода аналитических сетей и регрессионных моделей. Выявить ограничения и преимущества существующих методов в контексте слабой формализуемости исследуемых систем.

2. Разработать и исследовать метод прогнозирования экономических временных рядов, основанный на гибридном подходе, направленный на повышение точности прогностической модели.

3. Построить модель нечеткой когнитивной карты, отражающую прогнозирование курса доллара по отношению к рублю, с учётом ключевых причинно-следственных взаимосвязей в российском газовом бизнесе.

4. Разработать регрессионную модель прогнозирования курса доллара по отношению к рублю.

Решение поставленных задач позволило внести вклад в развитие методов машинного обучения для прогнозирования временных рядов в слабо формализованных системах.

2. Методика исследования

Обзор текущего состояния методов прогнозирования временных рядов

Прогнозирование временных рядов представляет собой ключевую задачу в аналитике данных, где точность модели имеет решающее значение для принятия управленческих решений. Среди современных подходов выделяются одиночные, ансамблевые и гибридные методы, каждый из которых имеет свои особенности и области применения [5]. Одиночные методы подразделяются на статистические и эконометрические методы, нейросетевые, методы глубокого обучения [5, 6].

Статистические методы являются фундаментальной основой анализа временных рядов. Особое место среди них занимает регрессионный анализ, который позволяет выявлять и количественно оценивать взаимосвязи с переменными. Регрессионный анализ начинается с построением многофакторной модели. Стандартный процесс включает оценку параметров модели многофакторной регрессионной модели. Наиболее распространенным методом является метод наименьших квадратов (МНК), который минимизирует сумму квадратов отклонений между фактическими и прогнозируемыми значениями:

$$\hat{\theta}_{\text{МНК}} = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (3)$$

где $\hat{\theta}_{\text{МНК}}$ – вектор оптимальных оценок параметров регрессии, найденных методом наименьших квадратов, X^T – транспонированная матрица X . Однако, при наличии гетероскедастичности или коррелированных ошибок применяются модификации МНК. Среди модификаций выделяют обобщенный метод наименьших квадратов (ОМНК) и взвешенный метод наименьших квадратов (ВМНК). ОМНК формализуется следующим образом:

$$\hat{\theta}_{\text{ОМНК}} = (X^T \Sigma^{-1} X)^{-1} X^T Y, \quad (4)$$

где Σ – положительно определенная ковариационная матрица ошибок наблюдений. ВМНК представляется в следующем виде:

$$\hat{\theta}_{\text{ВМНК}} = (X^T W X)^{-1} X^T W Y, \quad (5)$$

где W – диагональная матрица весов, элементы которой w_i компенсируют неоднородность дисперсий (гетероскедастичность) остатков.

В общем случае модель многофакторной регрессии описывается следующим выражением [7]:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) + \varepsilon, \quad (6)$$

где Y – прогнозируемая переменная, X_1, X_2, \dots, X_N – независимые переменные, влияющие на прогнозируемую величину, а ε – случайная компонента (ошибка модели), предполагаемая нормально распределенной и независимой.

Линейная многофакторная регрессионная модель, принимает следующий вид [7]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_N X_N + \varepsilon, \quad (7)$$

где $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$ – коэффициенты регрессии, подлежащие определению на основе данных, ε – случайная компонента (ошибка модели).

Эконометрические методы, такие как ARIMA и её модификации (например, SARIMA, ARIMAX), остаются популярными благодаря своей эффективности при работе со стационарными и линейными временными рядами [8]. Они применяются в задачах, где данные демонстрируют линейные зависимости, и широко используются в экономике и финансах для анализа временных рядов, таких как ВВП, инфляция или биржевые индексы.

Методы машинного обучения, такие как метод опорных векторов (SVM), решающие деревья (DT) и ансамбли деревьев (Random Forest), активно применяются для прогнозирования временных рядов [9].

Для решающих деревьев задача регрессии выражается как среднее значение целевой переменной в соответствующей листовой вершине:

$$\hat{y}(x) = \frac{1}{|R_j|} \sum_{i \in R_j} y_i, \quad (8)$$

где $\hat{y}(x)$ – прогнозируемое значение целевой переменной, $|R_j|$ – количество объектов в вершине R_j , y – фактическое значение. Для случайного леса задача регрессии формулируется усреднением прогнозов всех деревьев в ансамбле:

$$\hat{y}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i(x), \quad (9)$$

где $\hat{y}(x)$ – прогнозируемое значение целевой переменной $b_i(x)$ – прогноз i -го дерева решений для значения x , N – количество деревьев в ансамбле. К недостаткам перечисленных методов можно отнести трудоемкость вычислений при работе с крупномасштабными выборками.

Среди моделей машинного обучения в последние годы активно используются нейросетевые методы и методы, основанные на нейросетях глубокого обучения. Нейронные сети, включая многослойные перцептроны (MLP), рекуррентные нейронные сети (RNN), сети с долговременной кратковременной памятью (LSTM), успешно справляются с нелинейными зависимостями [10, 11].

Формального подхода к выбору характеристик искусственные нейронных сетей (ANN) не существует, в подавляющем большинстве случаев используются многослойные перцептроны (MLP), нейронные сети общей регрессии (GRNN), радиальный базис функциональные сети (RBFN), нечеткая сеть ARTMAP, вероятностная нейронная сеть (PNN) [10, 11]. Несмотря на то, что ANN успешно справляются с задачами прогнозирования временных рядов, им свойственны такие ограничения, как склонность к попаданию в локальные оптимумы, высокая зависимость от типичных выборок, чувствительность к начальным весам, медленная скорость обучения и проблема переобучения. Вышеупомянутые ограничения иногда приводят к тому, что ANN не могут обеспечить удовлетворительную точность предсказания [12].

Последние несколько лет для построения прогнозов стали активно использоваться методы глубокого обучения, использующие такие виды нейронных сетей, как сверточные нейронные сети (CNN), глубокие нейронные сети (DNN), рекуррентные нейронные сети (RNN) и нейронные сети с долговременной кратковременной памяти (LSTM), архитектуры-трансформеры [1, 13].

Помимо этого, хорошо зарекомендовали себя гибридные и ансамблевые методы прогнозирования временных рядов, которые используются для повышения точности прогноза [5, 12, 14]. Основное различие заключается в том, каким образом они интегрируют

различные модели и как предсказывают результат: ансамблевые методы используют независимые модели с последующим объединением результатов, а гибридные методы создают единую последовательную цепочку моделей, где каждая последующая использует результаты предыдущей.

При формировании ансамбля, как правило решаются следующие задачи: выбор соответствующих базовых алгоритмов, выбор стратегии ансамблирования и формирование решающего правила для объединения результатов. В качестве стратегии ансамблирования, как правило используется бэггинг, бустинг или стэкинг [15]. Бэггинг предполагает обучение нескольких моделей на подвыборках данных и последующее усреднение результатов. Бустинг оптимизирует модель, добавляя новые алгоритмы, компенсирующие ошибки предыдущих. Стекинг представляет собой метод, при котором прогнозы базовых моделей объединяются с помощью метамодели. В отличие от простого усреднения, стэкинг использует обучаемую метамодель, которая может учитывать относительную важность и точность каждой базовой модели, что часто приводит к более высокой точности предсказаний. В современной парадигме ансамблевого обучения выделяют следующие ключевые реализации: случайный лес, градиентный бустинг, усовершенствованный градиентный бустинг (XGBoost), оптимизированные реализации градиентного бустинга с быстрым построением бинарных деревьев (LightGBM), бустинг, адаптированный для работы с категориальными признаками (CatBoost), адаптивный алгоритм с итеративной корректировкой весов (AdaBoost) [16–18].

В работе [19] авторы провели сравнительный анализ эффективности нечётких когнитивных карт и классической регрессии при построении моделей системной динамики. На выборке из 250 точек данных средняя ошибка НКК составила 28%, тогда как регрессионный анализ продемонстрировал точность 10%. Это указывает на преимущество последнего при работе с относительно небольшими наборами данных.

Гибридные методы, как правило, сочетают статистические методы с подходами глубокого обучения для более точного прогнозирования [12, 20]. В некоторых случаях перед применением гибридных методов прогнозирования данные можно разделить на линейные и нелинейные компоненты – например, для этого можно использовать такие функции «вейвлет-преобразования», как «дискретное вейвлет-преобразование» [21].

Исследования показывают различные результаты применения гибридных подходов. Так, в работах [22–25] предложен оригинальный подход к построению прогнозов, где регрессионный анализ выступает в роли инструмента параметрической идентификации для определения весовых коэффициентов связей в НКК. Полученная модель используется как динамическая. Эффективность метода была проверена на задаче управления развитием сельскохозяйственных территорий с использованием временного ряда данных за период 2000–2017 гг. (204 наблюдения), однако авторы не приводят данных о сравнительной точности предложенного подхода.

В работе [26] автор данной статьи предложил иной подход, в рамках которого нечёткие когнитивные карты используются экспертами для выявления и формализации причинно-следственных связей между факторами, а также для интеграции дополнительных факторов в модель на основе экспертных оценок. Процесс моделирования включает комплексную оценку исследуемой ситуации с последующей количественной формализацией выявленных взаимосвязей. Определённые в ходе когнитивного анализа весовые коэффициенты причинно-следственных связей интегрируются в итоговую регрессионную модель. Существенной особенностью данного подхода является возможность модификации и расширения модели посредством включения новых концептов и связей. Применение данного подхода на малой выборке (36 временных точек) обеспечило точность прогноза по метрике MAPE на уровне 11,15% для прогнозируемого года.

В ряде работ отечественных авторов, гибридные подходы опираются на когнитивные нечеткие карты и регрессионные модели, нечеткие когнитивные карты и нейронечеткой сети ANFIS, нечеткие деревья решений или модели нечетких иерархий [27]. В этих работах идеи когнитивного моделирования, развиваемые В. Коско для моделирования динамических систем, были реализованы в виде инструментария нечетких когни-

тивных карт. НКК отражают структуру причинно-следственных связей между значимыми факторами ситуации. Её формируют в результате перевода когнитивных представлений и убеждений лиц, принимающих решения, и экспертов на формальный язык [28, 29].

Такие гибридные подходы особенно актуальны при исследовании сложных, слабо формализованных социально-экономических систем. Особенностью таких систем является то, что одни их факторы можно измерить количественно, а другие носят качественный, относительный характер. При этом для количественных факторов могут существовать статистические данные, в то время как для качественных единственным источником информации остаются знания экспертов. Стандартные подходы к идентификации НКК обычно ориентированы на работу с информацией только одного типа – либо статистической, либо экспертной.

Критерии сравнения методов

Основными метриками оценки качества прогноза являются [30]:

$$MAE = \frac{\sum |Y(t) - \hat{Y}(t)|}{n}, \quad (10)$$

MAE (средняя абсолютная ошибка) вычисляет среднее прогнозов $\hat{Y}(t)$ от фактических значений $Y(t)$, игнорируя знак отклонений. Устойчив к выбросам, измеряется в единицах исходных данных.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y(t) - \hat{Y}(t))^2}{n}}, \quad (11)$$

RMSE (корень из среднеквадратической ошибки) включает возведение отклонений в квадрат, что делает метрику более чувствительной к большим ошибкам. Единицы измерения совпадают с исходными данными.

$$MAPE = \left(\sum_{t=1}^n \left| \frac{Y(t) - \hat{Y}(t)}{Y(t)} \right| \right) \frac{100}{n}, \quad (12)$$

MAPE (средняя абсолютная процентная ошибка) измеряет среднюю абсолютную процентную ошибку. *MAPE* может быть чувствителен к малым значениям $Y(t)$, однако удобен для сравнения моделей.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y(t) - \hat{Y}(t))^2}{\sum (Y(t) - \bar{Y})^2}, \quad (13)$$

R^2 (коэффициент детерминации) показывает долю дисперсии, объясненной моделью. Диапазон значения принимает [0; 1].

$$RSE = \frac{\sum (Y(t) - \hat{Y}(t))^2}{n - 2}, \quad (14)$$

RSE (стандартная ошибка регрессии) оценивает точность предсказаний в исходных единицах измерения. Меньшие значения указывают на лучшую модель.

Анализируя ансамблевые и гибридные модели, невозможно однозначно определить, какой из подходов обеспечивает наилучшие общие результаты для всех данных, поскольку эффективность прогнозирования существенно зависит от специфики исходных временных рядов. Проведенный сравнительный анализ показывает преимущество комбинированных подходов над базовыми моделями. Так, при прогнозировании валютных пар INR/USD на рынке FOREX ансамблевые методы показали существенное улучшение точности: применение LSBoost снизило показатель *MAPE* с 0,863 до 0,715, а Bagging – до 0,695 [31]. А гибридные модели демонстрируют впечатляющие результаты при прогнозировании валютных курсов. Комбинация ARIMA и LSTM для прогнозирования курсов доллара и фунта позволила уменьшить *RMSE* с 0,022 до 0,0143 и снизить *MAPE* с 0,487 до 0,204 [32]. Значительный потенциал гибридных подходов подтверждается и при работе с макроэкономическими показателями. В частности, при прогнозировании индекса потребительских цен комбинация ARIMA и BPNN обеспечила снижение *RMSE* более чем в 2,5 раза – с 1,252 до 0,453 [33].

Особенно показательны результаты применения гибридных моделей на российских макроэкономических данных. При прогнозировании денежных доходов населения комбинация ARIMA с различными нейронными архитектурами (LSTM, RNN, GRU) продемонстрировала существенное улучшение метрик качества: $RMSE$ снизился с 7,01 до значений от 2,89 до 5,4, а MAE – с 5,86 до 2,35-5,03 [34].

Эффективность гибридных подходов подтверждается и в других прикладных задачах. Так, при прогнозировании промышленного потребления энергоресурсов в Москве комбинация нечетких когнитивных карт (НКК) с ANFIS позволила снизить $MAPE$ с 2,35 до 1,62 [35]. Аналогичные результаты получены при прогнозировании выручки от реализации газа, где гибридная модель НКК-регрессия обеспечила снижение $RMSE$ с 6340,7 до 5418,4 и $MAPE$ с 13,03 до 11,15 [26].

Представленные результаты убедительно демонстрируют преимущество ансамблевых и гибридных подходов в задачах прогнозирования временных рядов по сравнению с использованием отдельных базовых моделей.

На основе гибридного подхода, объединяющего нечеткое когнитивное картирование и регрессионный анализ был разработан авторский метод прогнозирования, состоящий из шести последовательных этапов обработки данных. Предложенный метод характеризуется повышенной точностью, устойчивостью к шумам и адаптивностью в условиях неопределенности, что делает его особенно эффективным при работе с временными рядами в условиях ограниченной выборки данных.

Отличительной особенностью данного метода является совместное использование различных методов прогнозирования, где достоинства одних вычислительных моделей компенсируют недостатки других, что создает синергетический эффект. Нечеткое когнитивное картирование в сочетании с методом аналитических сетей позволяет эффективно использовать экспертные знания при неполноте данных и проводить комплексную оценку причинно-следственных связей. Регрессионный анализ, используемый на последних стадиях, компенсирует потенциальные неточности прогнозов, получаемых на основе нечеткого когнитивного картирования. При этом недостатки классического регрессионного анализа, такие как чувствительность к выбросам и аномалиям, успешно устраняются благодаря предварительной обработке данных методами нечеткого когнитивного картирования. Особую значимость имеет применение метода аналитических сетей Т. Саати, который эффективно решает проблему мультиколлинеарности путем учета и устранения взаимозависимостей и обратных связей.

Структура разработанного метода представлена на рис. 1, где наглядно отражена последовательность выполнения всех этапов и взаимодействие компонентов модели.

Предлагаемый метод прогнозирования временных рядов

Рассмотрим подробно компоненты, которые участвуют в реализации метода и способствуют формализации неопределенности и повышению точности регрессионной модели.

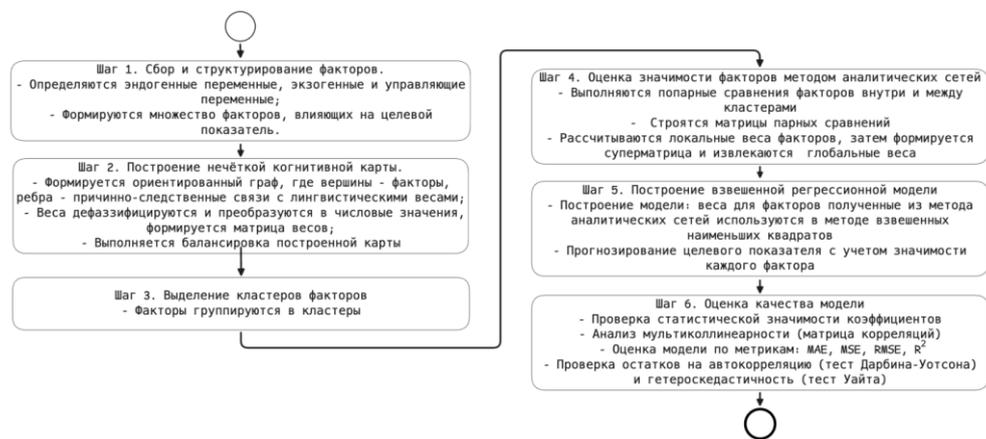


Рис. 1. Разработанный метод построения регрессионной модели

Источник: составлено авторами

Шаг 1. Сбор и структурирование факторов

На начальном этапе формируется перечень факторов, влияющих на целевой показатель, с их последующей систематизацией для моделирования. Унифицированный перечень будет использоваться всеми участниками при построении нечеткой когнитивной карты. Основные процедуры: идентификация факторов (составление перечня на основе отраслевой литературы, отчетности и экспертных интервью с учётом эндогенных (производственные показатели, финансы) и экзогенных (рыночные условия, регулирование) факторов), классификация, верификация источников данных и их подготовка. В дальнейшем под эндогенными факторами понимаются количественные производственные и финансовые показатели управляемой подсистемы (в нашем примере – газового бизнеса), тогда как экзогенные факторы описывают внешнюю рыночную, макроэкономическую и регуляторную среду. В контексте настоящего исследования термин «экзогенный» используется относительно подсистемы газового бизнеса и трактуется как «неподдающийся прямому управленческому воздействию», что не исключает существования более широких обратных связей на уровне национальной экономики.

Шаг 2. Построение нечеткой когнитивной карты

Взаимосвязи между факторами представляются в виде ориентированного взвешенного графа:

$$G = \langle C, E \rangle, \quad (15)$$

где C – множество вершин (факторов системы), E – множество ребер (дуг), представляющих причинно-следственные связи. Множество вершин агрегированной НКК формируется как объединение множеств факторов, предложенных в индивидуальных картах. Аналогично множество ребер E формируется как объединение всех предложенных связей. Весовые коэффициенты определяются экспертным путём на основе лингвистических оценок («слабое положительное», «сильное отрицательное»), задаваемых лингвистическими переменными. Каждому значению лингвистической переменной $t_k \in T_{ij}$ ставится в соответствие треугольное нечеткое число $t_k = (a_k, b_k, c_k)$, где $a_k < b_k < c_k$ и стандартной функции принадлежности $\mu(x_i)$. Индивидуальные нечеткие оценки по каждой дуге (C_i, C_j) агрегируются оператором нечеткого усреднения: покомпонентно усредняются параметры (a_k, b_k, c_k) треугольных чисел только тех карт, где связь присутствует, после чего выполняется дефаззификация агрегированного числа. При наличии противоположных знаков влияния по одной и той же дуге результирующее направление связи определяется по принципу большинства. Итоговые числовые значения приводятся к общей шкале $w_{ij} \in [-1, 1]$. Для каждой дуги $(C_i, C_j) \in E$ определяется весовой коэффициент w_{ij} , где:

- ◆ $w_{ij} > 0$: положительное влияние (усиление C_j при росте C_i);
- ◆ $w_{ij} < 0$: отрицательное влияние (ослабление C_j при росте C_i);
- ◆ $w_{ij} = 0$: отсутствие прямого влияния (C_i на фактор C_j).

Пусть вершина $C_\gamma \in C$ соответствует целевой переменной. На основе структуры графа G , весов w_i и механизма нечеткого вывода (дефаззификация) для каждого фактора $C_i \in C$ вычисляются наиболее значимые факторы для C_γ . Дефаззификация лингвистических оценок выполняется методом центра тяжести:

$$z = \frac{\sum \mu(x_i) \cdot x_i}{\sum \mu(x_i)}, \quad (16)$$

где $\mu(x_i)$ – значение функции принадлежности, x_i – значение универсальной шкалы. После преобразования проводится проверка совместимости факторов и моделирование распространения их влияния с помощью медианных операторов, удовлетворяющих аксиомам нормировки, неубывания, непрерывности и бисимметричности. Влияние от одного фактора C_i на фактор C_j с учетом их совместимости вычисляется как новое значение фактора-приемника C_j по формуле:

$$C_j = \text{med}(C_i, w_{ij}; c_{ij}), \quad (17)$$

где C_i – текущее значение фактора-источника, w_{ij} – вес связи, а $c_{ij} \in [0,1]$ – степень совместимости данных факторов, выступающая параметром операции. Степень совместимости факторов c_{ij} рассчитываются по формуле [36]:

$$c_{ij} = \frac{v_{ij}^+}{v_{ij}^+ + v_{ij}^-}, \quad (18)$$

где v_{ij}^+ и v_{ij}^- – положительные и отрицательные компоненты консонанса, отражающие степень согласованности C_i на C_j . Выходной результат данного компонента – совместимые факторы. Далее вычисляется мера влияния $I_{FCM}(C_Y) \geq 0$ на вершину V_Y с учётом балансировки факторов формируется подмножество факторов $C^{(1)} = \{C_i \in C | I_{FCM}(C_i) \geq \tau\}$, где $\tau > 0$, τ_1 – порог значимости, обладающих существенным влиянием на целевую переменную. На рис. 2 приведен фрагмент алгоритма построения ННК.

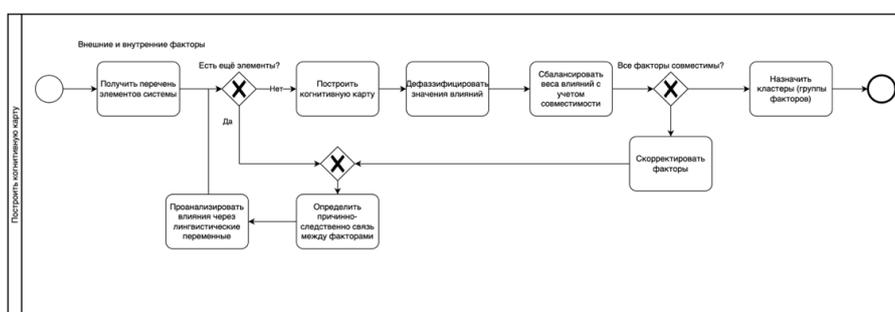


Рис. 2. Фрагмент алгоритма построения и балансировки факторов для нечеткой когнитивной карты (нотация BPMN)

Источник: составлено авторами

Шаг 3. Выделение кластеров факторов

Метод аналитических сетей (МАС) применяется для определения относительной значимости факторов системы и силы их взаимовлияния. Кластеризация факторов осуществляется путём экспертного разбиения множества факторов C на непересекающиеся подмножества (кластеры) $K = \{K_1, K_2 \dots K_k\}$, где $C = \cup_{k=1}^n K_k$ – объединение всех кластеров, $K_i \cap K_j = \emptyset$ при $i \neq j$ – условие непересекаемости кластеров. Такой подход позволяет структурировать множество факторов и обеспечить более точный анализ их взаимосвязей и значимости в рамках исследуемой системы.

Шаг 4. Оценка значимости факторов методом аналитических сетей

На основе экспертных оценок формируется матрица парных сравнений $A = [a_{ij}]$, где a_{ij} отражает относительное влияние фактора i на фактор j . Для контроля непротиворечивости суждений по матрице A вычисляется максимальное собственное значение λ_{max} , индекс согласованности при этом вычисляется, как:

$$ИС = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (19)$$

где n – размерность матрицы парных сравнений.

Отношение согласованности:

$$ОС = \frac{ИС}{СИ}, \quad (20)$$

где СИ – индекс по Саати. Условие $ОС < 0,1$ свидетельствует о приемлемой согласованности экспертных оценок [37].

По матрице A рассчитывается вектор весовых коэффициентов (приоритетов) $W = [w_1, w_2, \dots, w_i]$, где w_i – количественная мера значимости фактора C_i в рамках рассматриваемой системы. Нормализация выполняется для каждого фактора C_i внутри кластера: вычисляется сумма оценок по всем факторам $S_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}$, нормализованный вес определяется $w_j' = \frac{a_{ij}}{S_j}$. Сумма всех нормализованных весов равна единице, т.е. $\sum_{j=1}^n w_j' = 1$. Затем строится матрица попарных сравнений между кластерами и рассчитывается нормализованный вес между кластерами. Далее строится суперматрица матрица W_{super} , где блоки W_{ij} содержат векторы локальных приоритетов, показывающая влияние элементов кластера друг на друга, если элементы независимы, то блок заполняется нулями. Вычисление взвешенной суперматрицы по следующей формуле:

$$W_{limit} = \lim_{p \rightarrow \infty} (W_{weight})^p, \tag{21}$$

где W_{weight} – взвешенная суперматрица, p – степень, в которую возводится W_{weight} , W_{limit} – предельная суперматрица. Столбцы матрицы W_{limit} сходятся к одинаковым векторам, которые представляют собой глобальные веса факторов. Эти веса являются итоговым результатом метода аналитических сетей и отражают относительную важность каждого фактора в системе. На основании этих глобальных весов выполняется выбор наиболее значимых факторов по заданному порогу $\tau_2 > 0$ выполняется $V^* = \{W_j \in V^{(1)} | p_j \geq \tau_2\} = \{V_1, \dots, V_n\}$, где V^* – уточненное подмножество значимых факторов. На рис. 3 приведен фрагмент алгоритма выявления важных факторов.

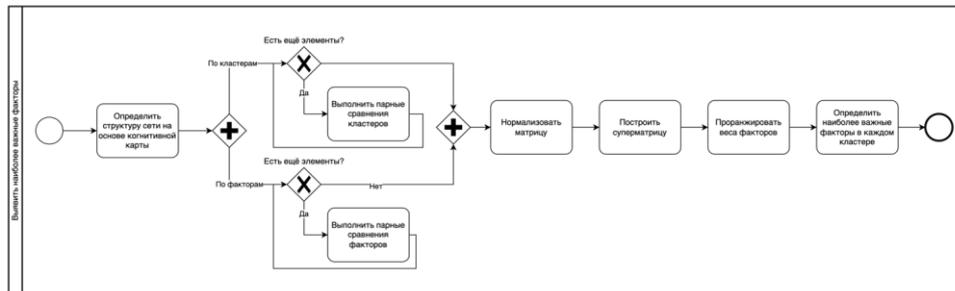


Рис. 3. Фрагмент алгоритма выявления важных факторов (нотация BPMN)

Источник: составлено авторами

Шаг 5. Построение взвешенной регрессионной модели

Коэффициенты модели оцениваются с весами, учитывающими значимость факторов:

$$w_i^{набл} = \sum_{j=1}^m w_j |x_{ij}|, \tag{22}$$

где $w_i^{набл}$ – вес -ого наблюдения, w_j – вес, отражающий значимость j -го фактора из МАС, x_{ij} – значение j -го фактора в i -ом наблюдении, m – количество факторов. Матрица весов наблюдений W является диагональной матрицей размерностью $n \times n$, где на главной диагонали расположены веса наблюдений w_i . Использование весов позволяет выделить на уровне модели наиболее значимые по мнению экспертов наборы данных, что интегрирует экспертные оценки в регрессионную модель. Оценки коэффициентов модели вычисляются по следующей формуле [38]:

$$\hat{\beta} = (X^T W X)^{-1} X^T W \hat{Y}, \tag{23}$$

где X – матрица факторов (размерность $n \times m$, где n – количество наблюдений, m – число факторов), \hat{Y} – вектор наблюдений целевого показателя (размерность $n \times 1$), W – диагональная матрица весов наблюдений (размерность $n \times n$). Цель модели – минимизация взвешенной среднеквадратичной ошибки:

$$\min \sum_i^n w_i (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (24)$$

где Y_i – фактическое значение целевой переменной для i -го наблюдения, \hat{Y}_i – предсказанное значение целевой переменной для i -го наблюдения, w_i – вес i -го наблюдения, рассчитанный по формуле 2.22 с учетом значимости факторов.

Итоговая модель:

$$\hat{Y}(t) = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^n \hat{\beta}_i (X_i(t)) + \varepsilon(t), \quad (25)$$

где $\hat{Y}(t)$ – прогнозируемое значение в момент времени t , $\hat{\beta}_0$ – свободный член модели, n – число факторов, $\hat{\beta}_i$ – оцененные коэффициенты регрессии, рассчитанные методом взвешенных наименьших квадратов с учетом веса (значимости) для фактора C_i , $X_i(t)$ – значение фактора в момент времени t , $\varepsilon(t)$ – случайная ошибка в момент времени. На рис. 4 приведен фрагмент алгоритма построения и проверки итоговой прогностической модели.

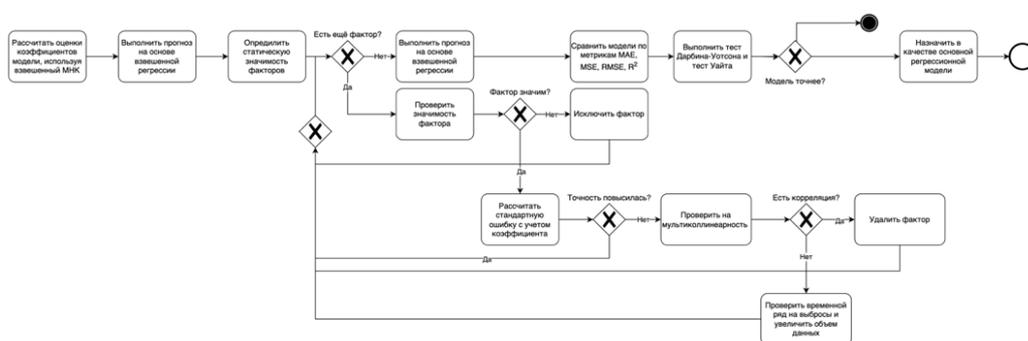


Рис. 4. Фрагмент алгоритма построения и проверки взвешенной регрессионной модели (нотация BPMN)

Источник: составлено авторами

Шаг 6. Оценка модели по метрикам качества

Для оценки модели выполняется проверка нулевой гипотезы $H_0: \beta_i = 0$ против $H_1: \beta_i \neq 0$ с использованием t-статистики. Используя p-value проверяется наименее значимые факторы. Вместе с оценкой значимости производят проверку на мультиколлинеарность для факторов $Corr(X_i, X_j)$. Далее для оценки значимости каждого коэффициента регрессии $\hat{\beta}_i$ вычисляется стандартная ошибка $SE(\hat{\beta}_i)$ по формуле:

$$SE(\hat{\beta}_i) = \hat{\sigma} \sqrt{((X'X)^{-1})_{ii}}, \quad (26)$$

где $\hat{\sigma}$ – стандартная ошибка регрессии, вычисляемая по формуле:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}, \quad (27)$$

X – матрица факторов, X' – транспонированная матрица X , $(X'X)^{-1}$ – обратная матрица, $((X'X)^{-1})_{ii}$ – i -й диагональный элемент обратной матрицы, который соответствует стандартной ошибке $\hat{\beta}_i$.

Используем стандартными метриками качества моделей $MAE, MSE, RMSE, R^2$ на основе формул (11)-(14).

Проанализируем остатки e_t на предмет отсутствия автокорреляции и гомоскедастичности. Для этого используются тест Дарбина-Уотсона:

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=2}^n e_t^2}, \quad (28)$$

где результаты теста интерпретируются следующим образом:

$DW \approx 2$ – отсутствует автокорреляция остатков;

$DW < 2$ – положительная автокорреляция, т.е. ошибки последовательно зависят друг от друга;

$DW > 2$ – отрицательная автокорреляция.

Для оценки гетероскедастичности используется тест Уайта, где определяется зависит ли дисперсия остатков от независимых переменных и их комбинаций. Вспомогательная регрессия:

$$e_i^2 = \alpha_0 + \alpha_1 X_{i1} + \dots + \alpha_n X_{in} + \varepsilon_i, \quad (29)$$

где α_0 – свободный член вспомогательной регрессии, $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ – коэффициенты вспомогательной регрессии, $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}$ – независимые переменные, ε_i – случайная ошибка вспомогательной регрессии.

Статистика Уайта:

$$\chi^2 = nR^2, \quad (30)$$

где n – определяет количество наблюдений. В свою очередь χ^2 сравнивается с критическим распределением хи-квадрат χ_{df}^2 , где под df понимается число факторов, учтенных в вспомогательной регрессии. Результат оценки теста Уайта оценивается по χ^2 , если он превышает критическое значение на заданных уровнях значимости α , то отвергаем нулевую гипотезу H_0 : гетероскедастичность присутствует, если меньше критического значения, то можно считать, что дисперсия ошибок постоянна.

3. Результаты и их обсуждение

Исходная многофакторная линейная регрессия:

$$Y = 68,7 + 0,41x_1 + 0,21x_4 + 0,36x_5 - 0,24x_6 + 0,32x_{10} + 0,29x_{12} + \varepsilon, \quad (31)$$

где x_1 – цена на нефть, x_4 – спрос на природный газ в РФ, x_5 – ставка ЦБ, x_6 – объем обязательной продажи выручки, x_{10} – объемы добычи газа в РФ, x_{12} – себестоимость газа. Для решения задачи прогнозирования влияния газового сектора на динамику курса доллара по отношению к рублю на основе исходной регрессионной модели факторов была разработана и построена нечеткая когнитивная карта с применением предложенного метода (рис. 5). В исследовании приняли участие девять экспертов – научные сотрудники одного из научно-исследовательских институтов ПАО «Газпром», а также ведущие преподаватели Финансовой академии при Правительстве РФ и МГТУ им. Н.Э. Баумана, специализирующиеся в области газовой промышленности. На этапе формирования НКК участвовало 6 экспертов. Совместно с экспертами был сформирован расширенный перечень факторов до 50, оказывающих значимое влияние на исследуемую зависимость, а также установлены причинно-следственные связи между ними. В качестве исходных данных использовались факторы, включённые в базовую регрессионную модель, а также данные, образующие временной ряд, содержащий 36 наблюдений, представленных с месячной дискретностью. В построенной нечеткой когнитивной карте был исключен фактор x_4 спрос на природный газ в РФ, который был в исходной регрессионной модели. После определения состава новых факторов и выявления связей между ними осуществлялась оценка степени влияния на основе лингвистических переменных, отражающих характер и силу взаимовлияния факторов. Полученные экспертные оценки были впоследствии дефазифицированы и агрегированы для вычисления итоговых весовых коэффициентов факторов. На заключительном этапе выполнялась балансировка модели, обеспечивающая согласованность структуры и стабильность результирующих весов.

Таблица 1

Кластеры факторов, выявленные по результатам анализа

Кластеры	Факторы	Интерпретация
Кластер 1 (C_1): Конъюнктура мировых рынков газа и нефти	x_1 – цена на нефть, x_2 – экспортные цены на природный газ, x_3 – цена газа на экспорт	Определяют внешнюю конъюнктуру и экспортные доходы
Кластер 2 (C_2): Макроэкономические условия РФ	x_5 – ставка ЦБ, x_6 – объем обязательной продажи валютной выручки, x_7 – приток внешних инвестиций,	Характеризируют внутреннюю финансовую устойчивость
Кластер 3 (C_3): Валютные и контрактные риски	x_8 – соотношение долгосрочных контрактов в разных валютах, x_9 – обменный курс рубля к юаню	Определяют валютную структуру выручки и валютные риски
Кластер 4 (C_4): Производственные показатели	x_{10} – объемы добычи природного газа в РФ, x_{11} – объемы поставок газа в Китай, x_{12} – себестоимость газа, x_{13} – транспортные расходы	Процесс производства и реализации природного газа

Источник: составлено авторами

Матрицы попарных сравнений формировались по шкале Саати (1-9) с соблюдением условий обратной симметрии ($a_{ij} = 1/a_{ji}$) и единичных значений на диагонали $a_{ij} = 1$. После агрегирования индивидуальных оценок трех экспертов, используя геометрическое среднее была получена интегрированная матрица попарных оценок. Для примера на рис. 6 представлены агрегированные матрицы попарных сравнения для кластера 1 и матрица попарных сравнений кластеров между собой.

Матрица парных сравнений для кластера 1				Матрица парных сравнения кластеров				
	x_1	x_2	x_3		C_1	C_2	C_3	C_4
x_1	1	2,38	3	C_1	1	1,7	1,3	1
x_2	0,42	1	2,37	C_2	0,59	1	1,3	1,7
x_3	0,33	0,42	1	C_3	0,77	0,77	1	0,8
				C_4	1	0,59	1,25	1

Рис. 6. Агрегированные матрица парных сравнений для кластера 1 и матрица парных сравнений кластеров

Источник: составлено авторами

Для агрегированной матрицы кластера 1 максимальное собственное значение составило $\lambda_{max} \approx 3,039$, индекс согласованности ИС $\approx 0,019$, отношение согласованности ОС $\approx 0,034$. Для агрегированной матрицы типа «кластер-кластер» получены $\lambda_{max} \approx 4,016$, ИС $\approx 0,036$, ОС $\approx 0,039$. Во всех случаях ОС $< 0,1$, что свидетельствует о приемлемой согласованности и групповых суждений как внутри кластера, так и между кластерами.

На следующем этапе на основе совокупности агрегированных матриц попарных сравнений была построена суперматрица методом аналитических сетей. Путем её нормировки и последовательного возведения в степень до сходимости, получена итоговая суперматрица, столбцы которой задают глобальные веса факторов. Рассчитанные таким образом глобальные веса приведены в табл. 2.

Таблица 2

Факторы, выявленные по результатам анализа и их глобальные веса

Факторы	Итоговый глобальный вес
x_1 – цена на нефть	0,18
x_2 – экспортные цены на природный газ	0,09
x_3 – цена газа на экспорт	0,05
x_5 – ставка ЦБ РФ	0,12
x_6 – объем обязательной продажи выручки	0,07
x_7 – приток внешних инвестиций в валюте	0,06
x_8 – соотношение долгосрочных контрактов	0,10
x_9 – обменный курс рубля к юаню	0,08
x_{10} – объемы добычи газа в РФ	0,08
x_{11} – объемы поставок газа в Китай	0,07
x_{12} – себестоимость газа	0,06
x_{13} – транспортные расходы	0,04

Источник: составлено автором

Используя формулу 2.24 расчета коэффициентов β для взвешенного метода наименьших квадратов, были получены итоговые коэффициенты регрессии.

$$Y = 0,42 + 0,31 \cdot x_1 + 0,22 \cdot x_2 + 0,15 \cdot x_3 - 0,18 \cdot x_5 - 0,14 \cdot x_6 - 0,12 \cdot x_7 + 0,20 \cdot x_8 + 0,17 \cdot x_9 - 0,11 \cdot x_{10} - 0,10 \cdot x_{11} + 0,09 \cdot x_{12} + 0,07 \cdot x_{13} + \varepsilon, \quad (32)$$

где x_1 – цена на нефть, x_2 – экспортные цены на природный газ, x_3 – цена газа на экспорт, x_5 – ставка ЦБ, x_6 – объем обязательной продажи выручки, x_7 – приток внешних инвестиций в валюте, x_8 – соотношение долгосрочных контрактов, x_9 – обменный курс рубля к юаню, x_{10} – объемы добычи газа в РФ, x_{11} – объемы поставок газа в Китай, x_{12} – себестоимость газа, x_{13} – транспортные расходы.

Реализация шагов 4–6 (оценка значимости факторов методом аналитических сетей, построение взвешенной регрессионной модели и оценка качества модели) осуществлялась с использованием программного обеспечения, зарегистрированного в Роспатенте [40]. Средняя погрешность вычислений составила $\pm 5\%$ при уровне доверия 95%, что обусловлено вариативностью оценок качества моделей в рамках процедур перекрёстной валидации.

В результате построения многофакторной регрессионной модели по предложенному методу и сопоставления полученных результатов с классическим подходом были получены значения, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение точности прогнозирования для задачи курс доллара по отношению к рублю: многофакторная регрессия и взвешенная регрессия

Модель	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>MAPE</i>
Исходная многофакторная линейная регрессия	0,38	0,30	11,65%
Взвешенная регрессия (гибридный метод)	0,22	0,18	7,12%

Из табл. 3 видно, что при использовании предложенного метода точность прогноза увеличилась на 42% по *RMSE* (среднеквадратичная ошибка снизилась с 0,38 до 0,22), на 40% по *MAE* (средняя абсолютная ошибка снизилась с 0,30 до 0,18) и на 39% по *MAPE* (средняя абсолютная процентная ошибка уменьшилась с 11,65% до 7,12%).

Выводы. В ходе исследования задачи прогнозирования была проведена оценка эффективности предложенного гибридного метода. Анализ метрик качества продемонстрировал значительное улучшение показателей прогнозирования. Среднеквадратичная ошибка (*RMSE*) снизилась с 0,38 до 0,22, что свидетельствует о существенном повышении точности модели. Параллельно наблюдалось уменьшение средней абсолютной ошибки (*MAE*) с 0,30 до 0,18. Важным снижением стало сокращение средней абсолютной процентной ошибки (*MAPE*), которая уменьшилась – с 11,65% до 7,12%.

Разработанный в рамках настоящего исследования метод уточнения многопараметрических регрессионных моделей, основанный на принципах нечеткого когнитивного анализа и метода аналитических сетей, демонстрирует значительный потенциал для прогнозирования финансово-экономических показателей российского газового бизнеса. Отличительной особенностью метода является возможность интеграции экспертных оценок и качественных взаимосвязей факторов в традиционные процедуры количественного моделирования. Это обеспечивает существенное повышение точности и надежности получаемых прогнозных значений, что особенно важно при принятии управленческих решений в условиях неопределенности газового рынка.

Практическая значимость метода определяется его способностью учитывать как количественные, так и качественные характеристики исследуемых процессов, что делает его эффективным инструментом для решения сложных задач прогнозирования в газовой отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Китова О.В., Дьяконова Л.П., Китов В.А., Савинова В.М. Применение нейронных сетей для прогнозирования социально-экономических временных рядов // *Russian Economic Bulletin*. – 2020. – Т. 3, № 5. – С. 188-201.
2. Ярушев С.А., Аверкин А.Н., Ефремова Н.А. Гибридные нечеткие когнитивные карты в задачах поддержки принятия решений и прогнозирования // *Программные продукты, системы и алгоритмы*. – 2017. – № 4. – С. 18-18.
3. Долгов Ю.А., Долгов А.Ю., Столяренко Ю.А. Анализ выборок малого объема и их применение // *Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление*. – 2013. – № 3 (45). – С. 79-90. – EDN XVSWBJ.
4. Воробьев Г.Г. Нечеткие когнитивные карты в искусственном интеллекте // *MCE.SU: «Математика. Компьютер. Образование»*. – 2010. – URL: <https://www.mce.biophys.msu.ru/archive/doc61132/doc.pdf> (дата обращения: 01.07.2025).
5. Cheng L., Yu T. A new generation of AI: A review and perspective on machine learning technologies applied to smart energy and electric power systems // *International Journal of Energy Research*. – 2019. – Vol. 43, No. 6. – P. 1928-1973.
6. Андрианова Е.Г., Головин С.А., Зыков С.В., Леско С.А., Чукалина Е.Р. Обзор современных моделей и методов анализа временных рядов динамики процессов в социальных, экономических и социотехнических системах // *Российский технологический журнал*. – 2020. – № 8 (4). – С. 7-45.
7. Арутюнов А.Л., Иванюк В.А., Цвиркун А.Д. Разработка инструментальных средств прогнозирования в социально-экономических системах // *Управление развитием крупномасштабных систем*. – 2015. – С. 241-293.
8. Ivanyuk V., Sunchalin A., Sunchalina A. Development of an intelligent ensemble forecasting system // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – Vol. 1294. – P. 491-500. – DOI: 10.1007/978-3-030-63322-6_40.
9. Parray I.R., Khurana S.S., Kumar M., Altalbe A.A. Time Series Data Analysis of Stock Price Movement Using Machine Learning Techniques // *Soft Computing*. – 2020. – No. 24. – P. 16509-16517. – <https://doi.org/10.1007/s00500-020-04957-x>.
10. Аламир Х.С., Заргарян Е.В., Заргарян Ю.А. Модель прогнозирования транспортного потока на основе нейронных сетей для предсказания трафика на дорогах // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2021. – № 6 (223). – С. 124-132.
11. Зелезецкий Д.В. Глубокое обучение в задаче прогнозирования финансовых временных рядов // *Тр. Московского физико-технического института*. – 2024. – Т. 16, № 3 (63). – С. 35-48.
12. Sina L.B., Secco C.A., Blazevic M., Nazemi K. Hybrid Forecasting Methods—A Systematic Review // *Electronics*. – 2023. – No. 12. – P. 2019. – <https://doi.org/10.3390/electronics12092019>.

13. *Alharbi M.H.* Prediction of the Price of Advanced Global Stock Markets Using Machine Learning: Comparative Analysis // *Journal of Financial Risk Management*. – 2024. – Vol. 13, No. 4. – P. 689-702.
14. *Ivanyuk V.* The method of residual-based bootstrap averaging of the forecast ensemble // *Financial Innovation*. – 2023. – Vol. 9, No. 1. – P. 37.
15. *Wu H., Levinson D.* The ensemble approach to forecasting: A review and synthesis // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2021. – Vol. 132. – P. 103357.
16. *Ke G. et al.* Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree // *Advances in neural information processing systems*. – 2017. – Vol. 30.
17. *Chen T., Guestrin C.* Xgboost: A scalable tree boosting system // *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*. – 2016. – P. 785-794.
18. *Freund Y., Schapire R.E.* A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting // *Journal of computer and system sciences*. – 1997. – Vol. 55, No. 1. – P. 119-139.
19. *Posmakov N.P., Emelyanenko A.S., Kireev V.S.* Fuzzy Cognitive Map Ensembles to Solve Regression and Time Series Tasks // *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. – IEEE, 2022. – P. 406-409.
20. *Katwal S., Shrestha R., Sharma G.* Analysis of Website Traffic Time Series Forecasting using ARIMA, Prophet, and LSTM RNN // *International Journal of Research Publications*. – 2024. – No. 146 (1). – P. 316-326. – doi: 10.47119/IJRP1001461420246271.
21. *Wu X. et al.* The development of a hybrid wavelet-ARIMA-LSTM model for precipitation amounts and drought analysis // *Atmosphere*. – 2021. – Vol. 12, No. 1. – P. 74.
22. *Подгорская С.В. и др.* Построение нечетких когнитивных моделей социально-экономических систем на примере модели управления комплексным развитием сельских территорий // *Бизнес-информатика*. – 2019. – Т. 13, № 3. – С. 7-19.
23. *Холодова М.А., Подвесовский А.Г., Исаев Р.А.* Нечеткая когнитивная модель стратегического управления агропродовольственным рынком // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2022. – № 2 (42). – С. 106-125.
24. *Захарова А.А., Подвесовский А.Г., Исаев Р.А.* Нечеткие когнитивные модели в управлении слабоструктурированными социально-экономическими системами // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. – 2020. – № 4 (20). – С. 5-23.
25. *Зимонина Ю.В., Исаев Р.А., Подвесовский А.Г.* Подсистема обмена данными в составе системы поддержки принятия решений на основе когнитивного моделирования «ИГЛА»: архитектура и особенности реализации // *Физико-техническая информатика (СРТ2020)*. – 2020. – С. 12-16.
26. *Романов Р.М.* Построение и применение нечетких когнитивных карт для оценки влияния капитальных проектов на финансовые результаты компании // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. – 2025. – № 1 (2). – С. 62-67. – DOI 10.37882/2223-2966.2025.01-2.17.
27. *Аверкин А.Н., Ярушев С.А., Павлов В.Ю.* Когнитивные гибридные системы поддержки принятия решений и прогнозирования // *Программные продукты и системы*. – 2017. – Т. 30, № 4. – С. 632-642. – DOI: 10.15827/0236-235X.120.632-642.
28. *Avdeeva Z.K., Grebenyuk E.A., Kovriga S.V.* Cognitive modelling-driven time series forecasting for predicting target indicators in non-stationary processes // *IFAC-PapersOnLine*. – 2021. – Vol. 54, No. 13. – P. 91-96.
29. *Кулинич А.А.* Компьютерные системы анализа ситуаций и поддержки принятия решений на основе когнитивных карт: подходы и методы // *Проблемы управления*. – 2011. – № 4. – С. 31-45.
30. *Бабешко Л.О., Орлова И.В.* Эконометрика и эконометрическое моделирование в Excel и R. – 2021.
31. *Handa R.* Prediction of foreign exchange rate using regression techniques. – 2017.
32. *Yilmaz F.M., Arabaci O.* Should deep learning models be in high demand, or should they simply be a very hot topic? A comprehensive study for exchange rate forecasting // *Computational Economics*. – 2021. – Vol. 57, No. 1. – P. 217-245.
33. *Hadwan M. et al.* A Hybrid Neural Network and Box-Jenkins Models for Time Series Forecasting // *Computers, Materials & Continua*. – 2022. – Vol. 70, No. 3.
34. *Пашишов Б., Петрусевич Д.А.* Анализ нейросетевых моделей для прогнозирования временных рядов // *Russian Technological Journal*. – 2024. – Т. 12, № 4. – P. 106-116.
35. *Борисов В.В., Луферов В.С.* Метод многомерного анализа и прогнозирования состояния сложных систем и процессов на основе нечетких когнитивных темпоральных моделей // *Системы управления, связи и безопасности*. – 2020. – № 2. – С. 1-23. – DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10201.
36. *Борисов В.В., Федулов А.С.* «Совместимые» нечеткие когнитивные карты // *Системы компьютерной математики и их приложения*. – 2016. – № 17. – С. 41-43.

37. *Saatu T.L.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети: пер. с англ. О.Н. Андрейчиковой / науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – 2-е изд. – М.: ЛИБРОКОМ: URSS, 2009. – 357 с. – ISBN 978-5-397-00844-0.
38. *Eng K., Chen Y.Y., Kiang J.E.* User's guide to the weighted-multiple-linear-regression program (WREG version 1.0): US Geological Survey Techniques and Methods, book 4, chap, viewed nd, from <http://pubs.usgs.gov/tm/tm4a8>. – 2009. – P. 21.
39. *Гусева А.И., Романов Р.М.* Программа для ЭВМ «Программное приложение для визуализации и построения нечетких когнитивных карт в задачах управления слабо формализованными системами», свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025660016 от 21.04.2025. Патентообладатель НИЯУ МИФИ (Россия). – 2025.
40. *Романов Р.М., Гусева А.И.* Программа для ЭВМ «Программное средство анализа и построения регрессионной модели на основе метода аналитических сетей для слабо формализованных систем», свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025686199 от 30.09.2025. Патентообладатель НИЯУ МИФИ (Россия). – 2025.

REFERENCES

1. *Kitova O.V., D'yakonova L.P., Kitov V.A., Savinova V.M.* Primenenie neyronnykh setey dlya prognozirovaniya sotsial'no-ekonomicheskikh vremennykh ryadov [Application of neural networks for forecasting socio-economic time series], *Russian Economic Bulletin*, 2020, Vol. 3, No. 5, pp. 188-201.
2. *Yarushev S.A., Averkin A.N., Efremova N.A.* Gibridnye nechetkie kognitivnye karty v zadachakh podderzhki prinyatiya resheniy i prognozirovaniya [Hybrid fuzzy cognitive maps in decision support and forecasting problems], *Programmnye produkty, sistemy i algoritmy* [Software products, Systems and Algorithms], 2017, No. 4, pp. 18-18.
3. *Dolgov Yu.A., Dolgov A.Yu., Stolyarenko Yu.A.* Analiz vyborok malogo ob"ema i ikh primeneniye [Analysis of small samples and their application], *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki. Ekonomika i upravlenie* [Bulletin of Pridnestrovian University. Series: Physical, Mathematical and Technical Sciences. Economics and Management], 2013, No. 3 (45), pp. 79-90. EDN XVSWBJ.
4. *Vorob'ev G.G.* Nечеткие когнитивные карты в искусственном интеллекте [Fuzzy cognitive maps in artificial intelligence], *MCE.SU: «Matematika. Komp'yuter. Obrazovanie»* [MCE.SU: "Mathematics. Computer. Education"], 2010. Available at: <https://www.mce.biophys.msu.ru/archive/doc61132/doc.pdf> (accessed 01 July 2025).
5. *Cheng L., Yu T.* A new generation of AI: A review and perspective on machine learning technologies applied to smart energy and electric power systems, *International Journal of Energy Research*, 2019, Vol. 43, No. 6, pp. 1928-1973.
6. *Andrianova E.G., Golovin S.A., Zykov S.V., Les'ko S.A., Chukalina E.R.* Obzor sovremennykh modeley i metodov analiza vremennykh ryadov dinamiki protsessov v sotsial'nykh, ekonomicheskikh i sotsiotekhnicheskikh sistemakh [Review of modern models and methods for analyzing time series of process dynamics in social, economic and sociotechnical systems], *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal], 2020, No. 8 (4), pp. 7-45.
7. *Arutyunov A.L., Ivanyuk V.A., Tsvirkun A.D.* Razrabotka instrumental'nykh sredstv prognozirovaniya v sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh [Development of forecasting tools in socio-economic systems], *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem* [Management of large-scale systems development], 2015, pp. 241-293.
8. *Ivanyuk V., Sunchalin A., Sunchalina A.* Development of an intelligent ensemble forecasting system, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, Vol. 1294, pp. 491-500. DOI: 10.1007/978-3-030-63322-6_40.
9. *Parray I.R., Khurana S.S., Kumar M., Altalbe A.A.* Time Series Data Analysis of Stock Price Movement Using Machine Learning Techniques, *Soft Computing*, 2020, No. 24, pp. 16509-16517. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00500-020-04957-x>.
10. *Alamir Kh.S., Zargaryan E.V., Zargaryan Yu.A.* Model' prognozirovaniya transportnogo potoka na osnove neyronnykh setey dlya predskazaniya trafika na dorogakh [A model for predicting traffic flow based on neural networks for predicting road traffic], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 6 (223), pp. 124-132.
11. *Zeletzkiy D.V.* Glubokoe obuchenie v zadache prognozirovaniya finansovykh vremennykh ryadov [Deep learning in the problem of forecasting financial time series], *Tr. Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta* [Transactions of the Moscow Institute of Physics and Technology], 2024, Vol. 16, No. 3 (63), pp. 35-48.

12. Sina L.B., Secco C.A., Blazevic M., Nazemi K. Hybrid Forecasting Methods—A Systematic Review, *Electronics*, 2023, No. 12, pp. 2019. Available at: <https://doi.org/10.3390/electronics12092019>.
13. Alharbi M.H. Prediction of the Price of Advanced Global Stock Markets Using Machine Learning: Comparative Analysis, *Journal of Financial Risk Management*, 2024, Vol. 13, No. 4, pp. 689-702.
14. Ivanyuk V. The method of residual-based bootstrap averaging of the forecast ensemble, *Financial Innovation*, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 37.
15. Wu H., Levinson D. The ensemble approach to forecasting: A review and synthesis, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, Vol. 132, pp. 103357.
16. Ke G. et al. Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree, *Advances in neural information processing systems*, 2017, Vol. 30.
17. Chen T., Guestrin C. Xgboost: A scalable tree boosting system, *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, 2016, pp. 785-794.
18. Freund Y., Schapire R.E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting, *Journal of computer and system sciences*, 1997, Vol. 55, No. 1, pp. 119-139.
19. Posmakov N.P., Emelyanenko A.S., Kireev V.S. Fuzzy Cognitive Map Ensembles to Solve Regression and Time Series Tasks, *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. IEEE, 2022, pp. 406-409.
20. Katwal S., Shrestha R., Sharma G. Analysis of Website Traffic Time Series Forecasting using ARIMA, Prophet, and LSTM RNN, *International Journal of Research Publications*, 2024, No. 146 (1), pp. 316-326. doi: 10.47119/IJRP1001461420246271.
21. Wu X. et al. The development of a hybrid wavelet-ARIMA-LSTM model for precipitation amounts and drought analysis, *Atmosphere*, 2021, Vol. 12, No. 1, pp. 74.
22. Podgorskaya S.V. i dr. Postroenie nechetkikh kognitivnykh modeley sotsial'no-ekonomicheskikh sistem na primere modeli upravleniya kompleksnym razvitiem sel'skikh territoriy [Construction of fuzzy cognitive models of socio-economic systems using the example of a management model for integrated development of rural areas], *Biznes-informatika* [Business Informatics], 2019, Vol. 13, No. 3, pp. 7-19.
23. Kholodova M.A., Podvesovskiy A.G., Isaev R.A. Nechetkaya kognitivnaya model' strategicheskogo upravleniya agropodovol'stvennym rynkom [Fuzzy cognitive model of strategic management of the agri-food market], *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society], 2022, No. 2 (42), pp. 106-125.
24. Zakharova A.A., Podvesovskiy A.G., Isaev R.A. Nechetkie kognitivnye modeli v upravlenii slabostrukturirovannymi sotsial'no-ekonomicheskimi sistemami [Fuzzy cognitive models in the management of weakly structured socio-economic systems], *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2020, No. 4 (20), pp. 5-23.
25. Zimonina Yu.V., Isaev R.A., Podvesovskiy A.G. Podsystema obmena dannymi v sostave sistemy podderzhki prinyatiya resheniy na osnove kognitivnogo modelirovaniya «IGLA»: arkhitektura i osobennosti realizatsii [Data exchange subsystem as part of the decision support system based on cognitive modeling "IGLA": architecture and implementation features], *Fiziko-tekhnicheskaya informatika (CPT2020)* [Physical and Technical Informatics (CPT2020)], 2020, pp. 12-16.
26. Romanov R.M. Postroenie i primenenie nechetkikh kognitivnykh kart dlya otsenki vliyaniya kapital'nykh projektov na finansovye rezul'taty kompanii [Construction and application of fuzzy cognitive maps for assessing the impact of capital projects on the company's financial results], *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Modern Science: Current Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences], 2025, No. 1 (2), pp. 62-67. DOI 10.37882/2223-2966.2025.01-2.17.
27. Averkin A.N., Yarushev S.A., Pavlov V.Yu. Kognitivnye gibridnye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy i prognozirovaniya [Cognitive hybrid systems for decision support and forecasting], *Programmnye produkty i sistemy* [Software Products and Systems], 2017, Vol. 30, No. 4, pp. 632-642. DOI: 10.15827/0236-235X.120.632-642.
28. Avdeeva Z.K., Grebenyuk E.A., Kovriga S.V. Cognitive modelling-driven time series forecasting for predicting target indicators in non-stationary processes, *IFAC-PapersOnLine*, 2021, Vol. 54, No. 13, pp. 91-96.
29. Kulnich A.A. Komp'yuternye sistemy analiza situatsiy i podderzhki prinyatiya resheniy na osnove kognitivnykh kart: podkhody i metody [Computer systems for situation analysis and decision support based on cognitive maps: approaches and methods], *Problemy upravleniya* [Problems of Management], 2011, No. 4, pp. 31-45.
30. Babeshko L.O., Orlova I.V. Ekonometrika i ekonometriceskoe modelirovanie v Excel i R [Econometrics and econometric modeling in Excel and R], 2021.
31. Handa R. Prediction of foreign exchange rate using regression techniques, 2017.

32. *Yilmaz F.M., Arabaci O.* Should deep learning models be in high demand, or should they simply be a very hot topic? A comprehensive study for exchange rate forecasting, *Computational Economics*, 2021, Vol. 57, No. 1, pp. 217-245.
33. *Hadwan M. et al.* A Hybrid Neural Network and Box-Jenkins Models for Time Series Forecasting, *Computers, Materials & Continua*, 2022, Vol. 70, No. 3.
34. *Pashshoev B., Petrusevich D.A.* Analiz neyrosetevykh modeley dlya prognozirovaniya vremennykh ryadov [Analysis of neural network models for time series forecasting], *Russian Technological Journal* [Russian Technological Journal], 2024, Vol. 12, No. 4, pp. 106-116.
35. *Borisov V.V., Luferov V.S.* Metod mnogomernogo analiza i prognozirovaniya sostoyaniya slozhnykh sistem i protsessov na osnove nechetkikh kognitivnykh temporal'nykh modeley [Method of multivariate analysis and forecasting of the state of complex systems and processes based on fuzzy cognitive temporal models], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control, Communications and Security Systems], 2020, No. 2, pp. 1-23. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10201.
36. *Borisov V.V., Fedulov A.S.* «Sovmestimye» nechetkie kognitivnye karty [“Compatible” fuzzy cognitive maps], *Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya* [Systems of Computer Mathematics and Their Applications], 2016, No. 17, pp. 41-43.
37. *Saati T.L.* Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: analiticheskie seti [Decision making with dependencies and feedbacks: analytical networks]: trans. from Engl. by O.N. Andreychikov, scientific ed. A.V. Andreychikov, O.N. Andreychikova. 2nd ed. Moscow: LIBROKOM: URSS, 2009, 357 p. ISBN 978-5-397-00844-0.
38. *Eng K., Chen Y.Y., Kiang J.E.* User's guide to the weighted-multiple-linear-regression program (WREG version 1.0): US Geological Survey Techniques and Methods, book 4, chap, viewed nd, from <http://pubs.usgs.gov/tm/tm4a8>, 2009, pp. 21.
39. *Guseva A.I., Romanov R.M.* Programma dlya EVM «Programmnoe prilozhenie dlya vizualizatsii i postroeniya nechetkikh kognitivnykh kart v zadachakh upravleniya slabo formalizovannymi sistemami», svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025660016 ot 21.04.2025. Patentoobladatel' NIYaU MIFI (Rossiya) [Computer program “Software application for visualization and construction of fuzzy cognitive maps in control problems of weakly formalized systems”, certificate of state registration of computer program No. 2025660016 dated April 21, 2025. Patent holder: National Research Nuclear University MEPHI (Russia)], 2025.
40. *Romanov R.M., Guseva A.I.* Programma dlya EVM «Programmnoe sredstvo analiza i postroeniya regressionnoy modeley na osnove metoda analiticheskikh setey dlya slabo formalizovannykh sistem», svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025686199 ot 30.09.2025. Patentoobladatel' NIYaU MIFI (Rossiya) [Computer program “Software for analysis and construction of regression models based on the analytical network method for weakly formalized systems”, certificate of state registration of computer program No. 2025686199 dated September 30, 2025. Patent holder: National Research Nuclear University MEPHI (Russia)], 2025.

Гусева Анна Ивановна – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; e-mail: aiguseva@mephi.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89037530059; д.т.н.; профессор кафедры экономики и менеджмента в промышленности.

Романов Родион Модестович – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; e-mail: rodion.romanov.m@yandex.com; г. Москва, Россия; тел.: 89859567629; инженер-исследователь кафедры экономики и менеджмента в промышленности.

Guseva Anna Ivanovna – National Research Nuclear University MEPHI; e-mail: aiguseva@mephi.ru; Moscow, Russia; phone: +79037530059; dr. of eng. sc.; professor of Department of Economics and Management in Industry.

Romanov Rodion Modestovich – National Research Nuclear University MEPHI; e-mail: rodion.romanov.m@yandex.com; Moscow, Russia; phone: +79859567629; Research of Engineer Department of Industrial Economics and Management.

А.Ф. Зайцев**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АГЕНТНО-МОДУЛЬНОГО ПОДХОДА ПРИ ПОСТРОЕНИИ И РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Информационно-вычислительные системы играют ключевую роль в обработке и анализе больших объемов данных, обеспечивая эффективное функционирование производства, предоставления, а также получения различных цифровых товаров и услуг. В условиях интеллектуализации и увеличения разнообразия функциональных требований, предъявляемых к информационным системам, возникает потребность в разработке новых подходов для их построения и реализации. В работе рассмотрены основные особенности применения предложенного агентно-модульного подхода, предполагающего построение гибких и масштабируемых информационно-вычислительных систем, способных функционировать в распределенной среде. Агентно-модульный подход представляет собой методологический подход к построению информационно-вычислительных систем, на основе интеграции методов системного анализа, а также агентного и модульного принципов организации систем. Цель работы – исследовать теоретические и практические аспекты использования предложенного агентно-модульного подхода, проанализировать его преимущества в сравнении с другими существующими подходами (объектным, компонентным, сервисным), а также представить пример построения информационной системы на основе его применения. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: – исследовать теоретические основы и выявить специфику практического применения предложенного агентно-модульного подхода; – выполнить анализ отличий и описать преимущества предложенного подхода при его сравнении с другими подходами; – представить пример построения информационно-вычислительной системы с использованием предложенного подхода. В процессе исследования были использованы следующие общенаучные методы: декомпозиция, анализ, синтез, сравнение, описание, формализация, структуризация, моделирование, проектирование, а также основные принципы модульного и агентного подходов. В качестве материалов исследования использовались компьютеры, инструментальные средства и программное обеспечение вычислительных систем. В результате исследования были рассмотрены основные теоретические и практические аспекты применения предложенного подхода. Агентно-модульный подход может быть использован для построения различных информационных систем на этапах, связанных с их моделированием и проектированием. Предложенный подход позволяет описывать структуру, функционирование, а также взаимодействие различных составных частей информационно-вычислительных систем.

Агентно-модульный подход; проектирование программных систем; разработка программных систем; информационные системы; вычислительные системы; обработка знаний; проектирование мультиагентных систем; системный анализ; информационное моделирование.

A.F. Zaytsev**FEATURES OF THE AGENT-MODULAR APPROACH APPLICATION IN THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF INFORMATION-COMPUTATIONAL SYSTEMS**

Information-computational systems play a key role in processing and analyzing large amounts of data, ensuring the efficient functioning of production, provision, as well as receipt of various digital goods and services. In the conditions of intellectualization and increasing diversity of functional requirements imposed on information systems, there is a need to develop new approaches for their construction and implementation. The paper considers the main features of the proposed agent-modular approach, which involves the construction of flexible and scalable information-computational systems capable of functioning in a distributed environment. The agent-modular approach is a methodological approach to the organization of information-computational systems based on the integration of system analysis methods, as well as agent and modular principle's of building various systems. The aim of the paper is to investigate theoretical and practical aspects of the application of the proposed agent-modular approach in building an information system, to analyze its advantages over other common approaches (object, component, service), and to present examples of its successful use. To achieve the set goal, it is necessary to solve the following tasks: – to research the theoretical foundations and identify the specific features of practical

application of the proposed agent-modular approach; – to analyze the differences and describe the advantages of the proposed approach in its comparison with other approaches; – to present an example of building an information-computational system using the proposed approach. The following general scientific methods were used in the research process: decomposition, analysis, synthesis, comparison, description, formalization, structurization, modeling, design, as well as the basic principles of system, modular and agent-based approaches. Computers, and computing software tools were used as research materials. As a result of the study, the main theoretical and practical aspects of the proposed approach were considered. The agent-modular approach can be used to build various information systems at the stages related to their modeling and design. The proposed approach allows describing the structure, functioning, and interaction of various components of information-computational systems.

Agent-modular approach; software systems design; software systems development; information systems; computational systems; knowledge processing; multiagent systems design; systems analysis; information modeling.

Введение. В настоящее время современные информационные технологии применяются во многих областях человеческой деятельности. Одним из наиболее перспективных ИТ-направлений является построение информационно-вычислительных и интеллектуальных систем обработки знаний. Подобные технические системы предназначены для автоматизации процессов анализа больших объемов данных и выдачи обоснованных результатов решений на базе множества знаний и закономерностей: принципов, правил, законов отображения, фактов, положений, убеждений и другой проверенной экспертной информации.

Для построения и реализации информационно-вычислительных систем используют различные существующие подходы (объектно-ориентированный, компонентно-ориентированный, сервисно-ориентированный, агентно-ориентированный), а также многие общеизвестные принципы (многоуровневости, иерархичности, модульности, разделения ответственности, открытой спецификации, openAPI и пр.) организации систем. Приведенные принципы и подходы являются основой для разработки более частных методик, приемов или паттернов проектирования систем [1]. В условиях интеллектуализации и увеличения разнообразия функциональных требований, предъявляемых к информационно-вычислительным системам, возникает потребность в разработке новых подходов к их построению и реализации. В текущей работе рассмотрены основные особенности применения предложенного агентно-модульного подхода, предполагающего построение гибких и масштабируемых информационно-вычислительных систем, способных функционировать в распределенной среде. Агентно-модульный подход представляет собой методологический подход к построению информационно-вычислительных систем, который основан на интеграции методов системного анализа, компьютерного логико-математического моделирования, а также агентного и модульного принципов организации систем. Первоначальная идея предложенного подхода была приведена в одной из ранних работ автора [2], но без каких-либо подробностей о его практическом применении.

Цель работы – исследовать теоретические и практические аспекты применения предложенного агентно-модульного подхода при построении информационно-вычислительных систем. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать теоретические основы и выявить специфику практического применения предложенного агентно-модульного подхода;
2. Описать основные отличия и преимущества предложенного подхода при его сравнении с другими подходами (объектным, компонентным, сервисным);
3. Представить пример построения информационно-вычислительной системы с использованием предложенного подхода.

Использование методологии системного анализа в контексте построения информационно-вычислительных систем. Практически все современные информационно-вычислительные системы строятся на базе обобщенного системного подхода и методологии системного анализа. Системный анализ представляет собой методологическую основу, которая может быть использована для решения задач: анализа, синтеза, проектирования, реализации, а также оценки эффективности (функционирования или качества) работы информационно-вычислительных систем.

Решение любой проблемы с использованием методологии системного анализа сопровождается определением и постановкой ряда отдельных задач, для решения которых требуется разработка и применение различных моделей, методов или методик. Процесс решения проблемы построения информационно-вычислительных систем с применением обобщенного системного подхода и методологии системного анализа можно отобразить в виде следующей схемы на рис. 1.

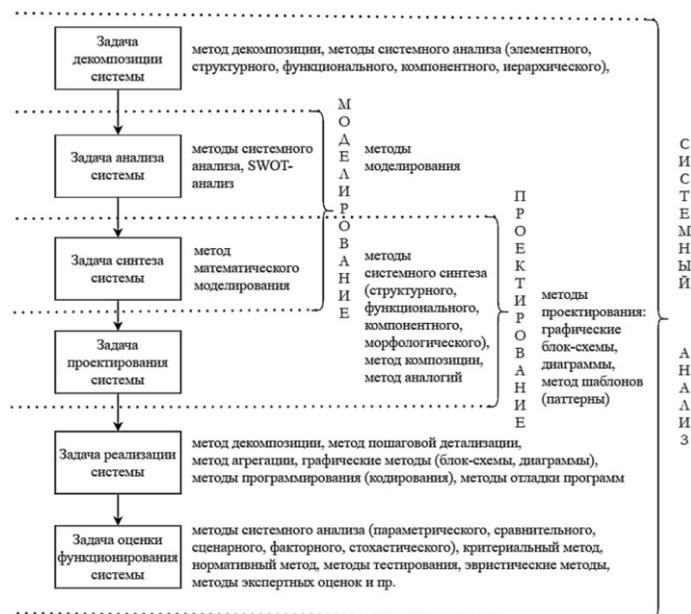


Рис. 1. Обобщенный системный подход к решению проблемы построения информационно-вычислительных систем с использованием методологии системного анализа

Множество общенаучных методов (и принципов) системного анализа служат основой для выработки и описания обобщенного системного подхода к решению существующей проблемы. Обобщенный системный подход отражает общий ход решения проблемы и представляет собой последовательность из согласованных этапов (шагов, стадий), как совокупности определённых, поставленных задач и применяемых методов для их решения.

Таким образом, применение различных методов системного анализа позволяет выполнять всесторонний анализ и синтез разрабатываемых информационно-вычислительных систем, выявлять оптимальные взаимосвязи между их составными частями и элементами, моделировать их структуру и архитектуру, а также на основе этого разрабатывать более эффективные алгоритмы анализа, управления и обработки информации.

Агентно-модульный подход и особенности его применения. На базе системного подхода был разработан и предложен агентно-модульный подход [2], который можно использовать для построения и реализации программных информационно-вычислительных систем. Предложенный методологический подход является частным случаем обобщенного системного подхода и использует только некоторые выбранные принципы и методы системного анализа. На рис. 2 приведена схема агентно-модульного подхода, в которую были добавлены корректировки и уточнения, относительно ранее представленного варианта [3].

Агентно-модульный подход – это методологический подход к построению и реализации информационно-вычислительных систем на основе обобщенной формальной модели, отражающей структурно-функциональную архитектуру системы в виде отдельных сущностей (агентов), которые после их алгоритмической реализации представляют собой автономные программные модули, способные взаимодействовать друг с другом.

Применение агентно-модульного подхода заключается в выполнении шести последовательных этапов (рис. 2), которые с использованием методологии системного анализа позволяют решить поставленную проблему и ключевые задачи: анализа, синтеза, проектирования и реализации системы. При этом одна часть этапов отражает процесс моделирования, а другая часть – процесс проектирования системы. Основной особенностью агентно-модульного подхода является совместное использование методов системного анализа [4], компьютерного логико-математического моделирования [5], а также агентно-ориентированного [6, 7] и модульного [8, 9] принципов организации программных информационно-вычислительных систем.



Рис. 2. Агентно-модульный подход к построению и реализации информационно-вычислительных систем

Основные отличия и преимущества агентно-модульного подхода. При сравнении предложенного подхода с уже существующими (объектно-ориентированным, компонентно-ориентированным и сервисно-ориентированным), можно выделить и описать ряд его принципиальных отличий.

Агентно-модульный подход использует принципы агентно-ориентированного подхода, который представляет собой обобщенную концепцию с введенным термином «агент» и его определением, как сущности с различными вариантами поведения, меняющимися в зависимости от состояния среды, в которой она находится [10]. В свою очередь, агентно-ориентированный подход является развитием объектно-ориентированного подхода, из чего следует то, что агенты взаимодействуют друг с другом через передачу сообщений. При использовании терминологии объектно-ориентированного подхода можно полагать, что агенты являются более сложными сущностями (составными объектами), которые состоят из множества взаимосвязанных простых объектов. Но в отличие от базового понятия «объект» агенты являются еще и автономными, интерактивными, а также обладающими своим внутренним состоянием и различными вариантами поведения. Основные отличия между понятиями «объект» и «агент» заключаются в следующем:

1) агенты ориентированы на открытие и предоставление информации (обмен данными), а объекты ориентированы на сокрытие информации (инкапсуляцию данных);

2) агенты ориентированы на прямое взаимодействие (сообщения с запросами и ответные реакции), как между внутренними частями одной системы, так и между внешними независимыми частями (агентами) других подобных систем. Объекты ориентированы только на взаимодействие между связанными внутренними частями (вложенность, полиморфизм и наследование объектов) одной системы;

3) агенты ориентированы на отдельный запуск и автономную работу (обработку данных) независимо от работы других частей (агентов) системы. Объекты не могут быть отдельно запущены и выполнять автономную работу независимо от других частей системы;

4) агенты не отслеживают состояния других агентов, не наследуются и не могут являться частями друг друга.

Кроме основных отличий, агенты также могут иметь такие дополнительные характеристики поведения, как: адаптивность, реактивность, проактивность, робастность, гибкость, инициативность, целенаправленность, коммуникативность, обучаемость и другие.

При использовании существующих формальных языков и парадигм (подходов) программирования [11], сущность агента может быть описана совокупностью различных элементов. Например, при использовании объектной парадигмы это могут быть взаимосвязанные классы с определенными свойствами и методами. При использовании функциональной парадигмы частями агента могут являться функции и функционалы с определёнными для них параметрами (переменными). При использовании структурной и процедурной парадигм сущность агента может быть описана структурами (совокупностью массивов переменных) и процедурами для их обработки. Таким образом, представление сущности агента в виде алгоритмической или программной реализации более правильно отождествлять с полнофункциональной программой, чем с отдельными составляющими: функциями, объектами, пакетами, библиотеками, компонентами или чем-то другим.

В предложенном агентно-модульном подходе с агентами отождествляются автономные программные модули – «агентные модули», содержащие заданное алгоритмическое описание сущности агента и конкретного механизма его взаимодействия с другими агентами, посредством передачи сообщений. На основании этого, в контексте построения программных информационно-вычислительных систем можно привести следующие определения агентного модуля и агента:

Агентный модуль – это автономный программный модуль, организованный в виде одного или нескольких связанных файлов, содержащих блоки с правильно оформленным кодом, записанным на некотором языке программирования. Блоки с кодом в файле агентного модуля алгоритмически отражают структуру и функционирование сущности агента в виде различных взаимосвязанных элементов: переменных, структур, классов, функций и т.п.

Агенты – это полностью завершённые, скомпилированные и автономно исполняемые агентные модули, то есть полнофункциональные работающие программы.

Агенты воспринимают и проецируют любые входящие сообщения на действия (функции), которые они могут самостоятельно выполнить, или на элементы состояния (параметры), которые могут повлиять на их дальнейшие действия. Агенты содержат только два вида реакции обратной связи: когда цель была ими достигнута, и когда цель не достигнута. В отличие от объектов, агенты могут принимать на себя обязательства по выполнению некоторых действий или, наоборот, отказываться от их выполнения. Агент не обязательно выполняет требования каких-либо других агентов или пользователей, он просто зависит от условий среды, своих целей и намерений других агентов. Функционирование информационно-вычислительной системы состоит из информирования множества агентов, принятия или отклонения ими различных предложений и требований, а также выполнения агентами определенных действий с последующими ответными реакциями (путем отправки и приема различных сообщений между независимыми и автономно исполняемыми модулями).

Отличия предложенного агентно-модульного подхода при его сравнении с компонентно-ориентированным и сервисно-ориентированным подходами построения информационно-вычислительных систем представлены на рис. 3.

В компонентно-ориентированном и сервисно-ориентированном подходах, кроме ключевых понятий «компонент» и «сервис», также встречается понятие модуля. Однако в данных существующих подходах понятие модуля отражает несколько иной смысл:

Модуль – это функциональная единица, представляющая собой совокупность взаимосвязанных файлов (пакетов и библиотек) с частями фрагментов кода на уровне написания программ. Модули реализуют функциональные возможности системы в виде за-

вершенных блоков кода с определением и реализацией различных отдельных методов, функций или объектов. В компонентном и сервисном подходах модули не являются полностью автономными исполняемыми (скомпилированными) программами.

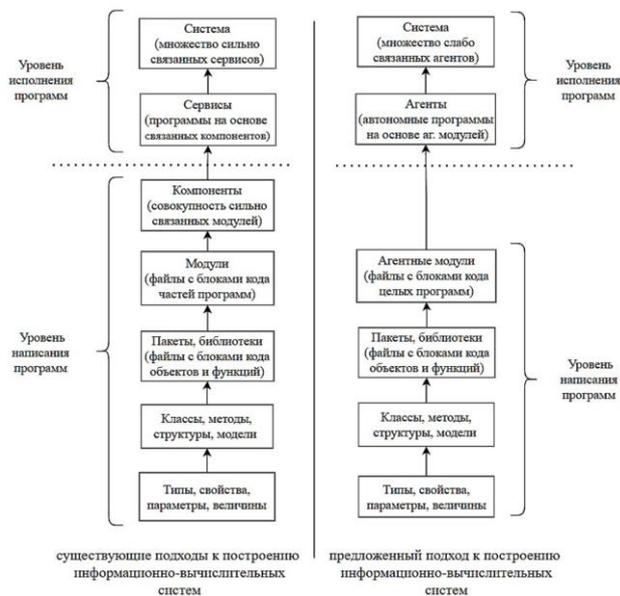


Рис. 3. Отличия подходов к построению информационно-вычислительных систем

Компонент – это конструктивная единица, являющаяся составной частью некоторой системы или её подсистемы. Компоненты предназначены для их повторного переиспользования и взаимосвязи с другими компонентами, содержащими определенные функциональные возможности модулей. Компоненты представляют собой совокупность из нескольких сильносвязанных модулей на уровне написания кода программ. В компонентах реализуется рекомендованный, заранее определенный и общий для всех интерфейс взаимодействия, соответствующий их единообразному поведению внутри системы.

Сервис – это подсистема, организованная в виде совокупности взаимосвязанных между собой независимых компонентов. Сервисы предназначены для выполнения конкретных бизнес-функций и предоставления пользователям различных услуг на уровне исполнения программ. Часто архитектура больших и сложных информационно-вычислительных систем представляется в виде множества сильносвязанных друг с другом сервисов (подсистем), как отдельно скомпилированных и работающих программ.

Основные отличия компонентов и сервисов от агентов заключаются в следующем:

- 1) агенты отражают только одну сущность предметной области и ее функциональные особенности поведения. Компоненты и сервисы соответствуют множеству связанных сущностей и понятий;
- 2) компоненты и сервисы сильно связаны между собой, а агенты связаны слабо и все функции взаимодействия должны быть отдельно определены в их интерфейсах;
- 3) интерфейс компонентов и сервисов сильно связан вместе с их реализацией. Реализация функционального поведения агентов и их интерфейсов – разграничены.

Построение системы с использованием предложенного подхода. В качестве результата применения предложенного подхода на рис. 4 представлена архитектура построенной информационно-вычислительной системы обработки знаний. Построенная система предназначена для поиска, формирования и вывода решений вместе с их численными результатами на основе знаний, полученных из постановок задач из области теоретической механики. Моделирование структурно-функциональной организации модулей системы, а также описание программной реализации базы данных и знаний было представлено в других предыдущих работах автора [12].

При использовании агентно-модульного подхода архитектура системы условно-логически разбивается на две части: внутреннюю и внешнюю. Внешняя часть представляется в виде отдельного модуля, взаимодействующего с окружающей средой, пользователями и внешними системами для приема/передачи сообщений через определенный интерфейс (графический и внутренний). Внутренняя часть представляется в виде множества автономно работающих агентных модулей (программ), взаимодействующих друг с другом через отдельно определенные (внутренние) интерфейсы: агент ввода/вывода, агент поиска решений, агент взаимодействия с базой данных и знаний, агент вычисления результатов решений и другие (рис. 4).

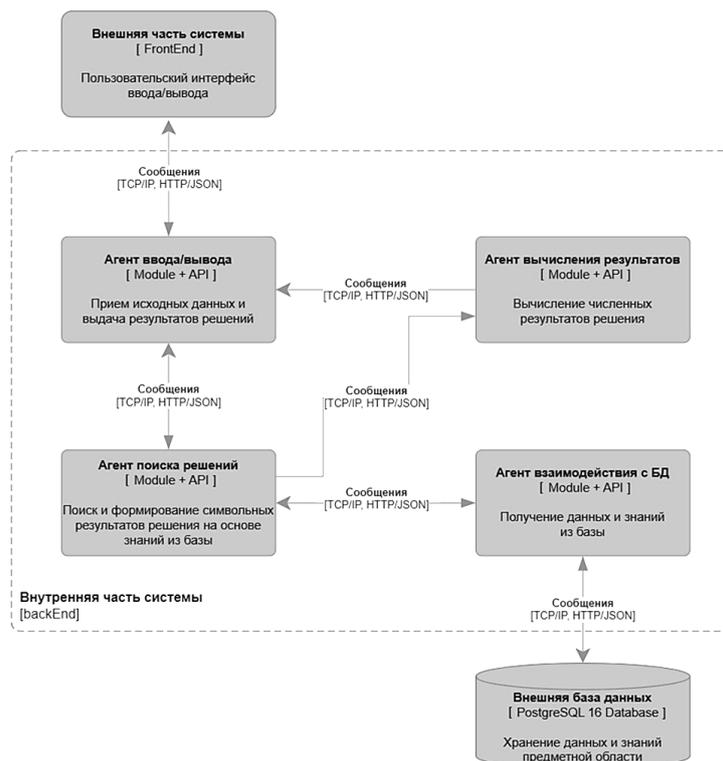


Рис. 4. Архитектура построенной информационно-вычислительной системы с применением агентно-модульного подхода

Каждый автономный агентный модуль для достижения своих основных целей выполняет множество определённых внутренних функций:

агент ввода/вывода – осуществляет прием исходных данных и выдачу полученных итоговых результатов решений задач;

агент поиска решений – выполняет поиск и формирование символьных результатов решений на основе данных и знаний из базы;

агент взаимодействия с базой – выполняет извлечение, предобработку и передачу необходимой информации (данных и знаний);

агент вычисления результатов решений – производит численные вычисления и передачу полученных итоговых результатов решений задач.

В состав системы можно добавлять и другие разнообразные агентные модули. Для связи модулей в каждом из них реализуется подмножество функций, которые образуют программный интерфейс их взаимодействия – API (Application Programming Interface). Таким образом, подмножество функций интерфейса в модуле могут вызывать подмножество других его внутренних функций, которые в свою очередь изменяют состояние и поведение сущности агента.

На различных алгоритмических языках программирования интерфейс (API) в модулях реализуется достаточно просто. Например, на языке Python (Питон) интерфейс взаимодействия в каждом модуле можно реализовать на базе следующих подключаемых пакетов: FastAPI, Django, Flask или других [13, 14]. В приведенном ниже листинге показан пример кода на языке Python [15, 16], отражающий реализацию функций интерфейса (call_input, call_output) агентного модуля с использованием подключаемого пакета Flask [17]:

```
from flask import Flask, jsonify, request, make_response
import requests
app = Flask()

@app.route('/call_input', methods=['GET', 'POST'])
def call_input():
    data = request.get_json()
    #выполнение множества других внутренних функций модуля...
    resp = requests.post(url='/call_search', json=data)
    if resp.status_code == 200:
        return jsonify({'success':True, 'act':'call_search',
'data':data})
    else:
        return jsonify({'success': False})

@app.route('/call_output', methods=['GET', 'POST'])
def call_output():
    #выполнение множества других внутренних функций модуля...
    return jsonify({'success':True, 'act':'call_output',
'data':data})
```

В процессе программной реализации агентных модулей можно выполнять их запуск и тестирование на одной локальной машине с указанием различных номеров для сетевых портов. Для реализации передачи информации можно использовать различные протоколы и технологии, например: TCP/IP, HTTPS, SSE, WebSocket, WebRTC, AsyncIO [18] и другие.

К преимуществам предложенного агнетно-модульного подхода можно также отнести следующее:

- 1) агентные модули могут иметь одноранговые (прямые и обратные) связи друг с другом, позволяющие строить мультиагентные системы [19] с симметричной архитектурой;
- 2) агентные модули могут быть реализованы независимо и на разных формальных языках программирования;
- 3) агентные модули организуются на основе множества «чистых» функций и всегда выполняют только свои внутренние базовые функции;
- 4) агентные модули имеют упрощенную организацию, их более удобно обновлять, заменять, а также дублировать и размещать в любое время;
- 5) агентные модули могут исполняться автономно в различных средах виртуализации и контейнеризации, а также на разных операционных системах и микропроцессорных архитектурах.

Каждый разработанный агентный модуль может быть запущен отдельно и работать автономно с использованием технологий контейнеризации, например, такой как Docker [20, 21]. Это дает возможность размещения агентных модулей на разных узлах (компьютерах) в распределенной среде и сети Интернет. При этом можно размещать несколько запасных копий агентных модулей, настраивать переадресацию и выполнять перенаправление данных между копиями в случае недоступности или отказа работы основных модулей.

Заключение. В результате исследования были рассмотрены основные теоретические и практические аспекты применения предложенного подхода. Агентно-модульный подход является эффективным средством для построения и реализации современных ин-

формационно-вычислительных систем. Разработанный подход позволяет описывать структуру, функционирование, а также взаимодействие различных составных частей информационно-вычислительных систем в виде агентных модулей. Подход может быть использован для построения различных информационных систем на этапах, связанных с их моделированием и проектированием.

Предложенный подход сочетает в себе преимущества принципов автономности и модульности, что позволяет строить гибкие и масштабируемые информационные системы. Применение предложенного подхода возможно в самых разных областях и направлениях, требующих построения программных информационных систем, начиная от выполнения локальных вычислений и заканчивая интеллектуальной обработкой глобально распределённых больших данных.

Дальнейшее совершенствование предложенного подхода связано с разработкой и реализацией методов координации, синхронизации и интеллектуализации действий агентных модулей (AI-агентов, ИИ-агентов) [22, 23], а также с унификацией и стандартизацией интерфейса для их взаимодействия. Это позволит ещё больше расширить область применения агентно-модульного подхода и сделать его основным подходом для построения сложных информационно-вычислительных и распределённых интеллектуальных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р. и др. Паттерны объектно-ориентированного проектирования. Юбилейное издание. – СПб.: Питер, 2025. – 448 с.
2. Зайцев А.Ф. Агентно-модульный подход к проектированию и реализации программных систем на основе имитационного моделирования // System Analysis and Mathematical Modeling. – 2023. – Т. 5, № 3. – С. 338-349. – DOI: 10.17150/2713-1734.2023.5(3).338-349.
3. Зайцев А.Ф. Математическая модель структурно-функциональной организации программно-информационных вычислительных систем // Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 114-9. – С. 20-26. – DOI: 10.18411/trnio-10-2024-376.
4. Дреус Ю.Г. Основы системного анализа. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 260 с.
5. Zaytsev A.F., Kravchenko V.A., Shirapov D.Sh. An approach to logical-mathematical computer modeling of linear and nonlinear dynamical systems // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 583. – P. 06014. – DOI: 10.1051/e3sconf/202458306014.
6. Принев М.А., Леденева Т.М., Гаршина В.В. Многоагентные системы: обзор современных подходов к моделированию и проектированию (Ч. 2) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2024. – № 4. – С. 167-190. – DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2024/4/167-190.
7. Голенков В.В., Шункевич Д.В. Агентно-ориентированные модели, методика и средства разработки совместимых решателей задач интеллектуальных систем // Программные продукты и системы. – 2020. – №3. – С. 404-412. – DOI: 10.15827/0236-235X.131.404-412.
8. Модульное программирование – РУВИКИ: научно-образовательный портал. – URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Модульное_программирование (дата обращения: 01.06.2025).
9. Модульное программирование – Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал. – URL: <https://bigenc.ru/c/modul-noe-programmirovanie-ecb7b3/?v=3964503> (дата обращения: 01.06.2025).
10. Агентно-ориентированный подход – РУВИКИ: научно-образовательный портал. – URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Агентно-ориентированный_подход (дата обращения: 10.06.2025).
11. Бабаев Б., Чарыева А., Чолуков Х. Парадигмы программирования: функциональное и объектно-ориентированное // Вестник науки. – 2024. – Т. 3, № 10 (79). – С. 877-880.
12. Зайцев А.Ф. Подход к преобразованию модели базы знаний предметной области на основе мультиграфа в реляционную модель базы данных // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – № 4. – С. 158-178. – DOI: 10.24412/2410-9916-2024-4-158-178.
13. Lubanovic B. FastAPI. Modern Python Web development. – Sebastopol: O'Reilly Media Inc., 2023. – 280 p.
14. Attardi J. Web API. Cookbook. – Sebastopol: O'Reilly Media Inc., 2024. – 286 p.
15. Manglik R. et al. Python notes for professionals. – Lucknow: EduGorilla publication, 2024. – 841 p.
16. Зайцев А.Ф. Преимущества и недостатки языка программирования Python при построении распределённых программных систем // Развитие современных технологий: теоретические и практические аспекты: Сб. статей V Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 14 октября 2024 года. – Петрозаводск: МЦНП «Новая Наука», 2024. – С. 73-77. – EDN N1H1ON.

17. *Tragura S.J.C.* Mastering Flask Web and API development. – Birmingham: Packt publishing, 2024. – 494 p.
18. *Fox D.* Python for asynchronous programming with AsyncIO. – Seattle: Amazon digital services LLC, 2024. – 126 p.
19. *Листопад С.В., Кириков И.А.* Архитектуры интеллектуальных агентов сплоченных гибридных интеллектуальных многоагентных систем // Системы и средства информатики. – 2022. – Т. 32, № 2. – С. 81-91. – DOI: 10.14357/08696527220208.
20. *Öggl B., Kofler M.* Docker: Practical guide for developers and DevOps teams. – Bonn: Rheinwerk Publishing Inc., 2023. – 491 p.
21. *Jones P.* Docker, Jenkins and Kubernetes: Mastering DevOps automation. – NY.: Walzone press, 2024. – 266 p.
22. *Тейлор М.* Эпоха ИИ-агентов. – Екатеринбург: Изд-во Ridero, 2025. – 84 с.
23. *Гохберг Л.М., Туровец Ю.В., Вишневецкий К.О.* Искусственный интеллект в России: технологии и рынки. – М.: НИУ ВШЭ, 2025. – 148 с. – DOI: 10.17323/978-5-7598-3019-1.

REFERENCES

1. *Gamma E., Khelm R., Dzhonson R. i dr.* Patterny ob"ektno-orientirovannogo proektirovaniya. Yubileynoe izdanie [Design Patterns: Elements of reusable object-oriented software]. Saint-Petersburg: Piter, 2025, 448 p.
2. *Zaytsev A.F.* Agentno-modul'nyy podkhod k proektirovaniyu i realizatsii programmykh sistem na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Agent-module approach to the design and implementation of software systems based on simulation modeling], *System Analysis and Mathematical Modeling*, 2023, Vol. 5, No. 3, pp. 338-349. DOI: 10.17150/2713-1734.2023.5(3).338-349.
3. *Zaytsev A.F.* Matematicheskaya model' strukturno-funktsional'noy organizatsii programmno-informatsionnykh vychislitel'nykh sistem [A mathematical model of the structural-functional organization of software-information computational systems], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in Science and Education], 2024, No. 114-9, pp. 20-26. DOI: 10.18411/trnio-10-2024-376.
4. *Drevs Yu.G.* Osnovy sistemnogo analiza [Fundamentals of system analysis]. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2024, 260 p.
5. *Zaytsev A.F., Kravchenko V.A., Shirapov D.Sh.* An approach to logical-mathematical computer modeling of linear and nonlinear dynamical systems, *E3S Web of Conferences*, 2024, Vol. 583, pp. 06014. DOI: 10.1051/e3sconf/202458306014.
6. *Prinev M.A., Ledeneva T.M., Garshina V.V.* Mnogoagentnye sistemy: obzor sovremennykh podkhodov k modelirovaniyu i proektirovaniyu (Ch. 2) [Multi-agent systems: a review of modern approaches to modeling and projecting (Part 2)], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies], 2024, No. 4, pp. 167-190. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2024/4/167-190.
7. *Golenkov V.V., Shunkevich D.V.* Agentno-orientirovannye modeli, metodika i sredstva razrabotki sovместимых reshateley zadach intellektual'nykh sistem [Agent-based models, methods and tools for the development of compatible problem-solvers for intelligent systems], *Programmnyye produkty i sistemy* [Software & Systems], 2020, No. 3, pp. 404-412. DOI: 10.15827/0236-235X.131.404-412.
8. Modul'noe programmirovaniye – RUVIKI: nauchno-obrazovatel'nyy portal [Modular programming – RUVIKI: scientific and educational portal]. Available at: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Modul'noe_programmirovaniye (accessed 01 June 2025).
9. Modul'noe programmirovaniye – Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya: nauchno-obrazovatel'nyy portal. Available at: <https://bigenc.ru/c/modul-noe-programmirovaniye-ecb7b3/?v=3964503> (accessed 01 June 2025).
10. Agentno-orientirovannyy podkhod – RUVIKI: nauchno-obrazovatel'nyy portal [Agent-oriented approach – RUVIKI: scientific and educational portal]. Available at: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Agentno-orientirovannyy_podkhod (accessed 01 June 2025).
11. *Babaev B., Charyeva A., Cholukov Kh.* Paradigmy programmirovaniya: funktsional'noe i ob"ektno-orientirovannoe [Programming paradigms: functional and object-oriented], *Vestnik nauki* [Bulletin of Science], 2024, Vol. 3, No. 10 (79), pp. 877-880.
12. *Zaytsev A.F.* Podkhod k preobrazovaniyu modeli bazy znaniy predmetnoy oblasti na osnove mul'tigrafu v relyatsionnyuyu model' bazy dannykh [An approach to transforming a model of multigraph knowledge base of the subject area into a relational database model], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2024, No. 4, pp. 158-178. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-4-158-178.

13. *Lubanovic B.* FastAPI. Modern Python Web development. Sebastopol: O'Reilly Media Inc., 2023, 280 p.
14. *Attardi J.* Web API. Cookbook. Sebastopol: O'Reilly Media Inc., 2024, 286 p.
15. *Manglik R. et al.* Python notes for professionals. Lucknow: EduGorilla publication, 2024, 841 p.
16. *Zaytsev A.F.* Preimushchestva i nedostatki yazyka programmirovaniya Python pri postroenii raspredelennykh programmnykh sistem [Advantages and disadvantages of Python programming language in developing distributed software systems], *Razvitie sovremennykh tekhnologiy: teoreticheskie i prakticheskie aspekty: Sb. statey V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Petrozavodsk, 14 oktyabrya 2024 goda* [Development of modern technologies: Theoretical and practical aspects, Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference, Russia, Petrozavodsk, 14 October, 2024]. Petrozavodsk: MTSNP «Novaya Nauka», 2024, pp. 73-77. EDN NIHION.
17. *Tragura S.J.C.* Mastering Flask Web and API development. Birmingham: Packt publishing, 2024, 494 p.
18. *Fox D.* Python for asynchronous programming with AsyncIO. Seattle: Amazon digital services LLC, 2024, 126 p.
19. *Listopad S.V., Kirikov I.A.* Arkhitektury intellektual'nykh agentov splochnykh gibridnykh intellektual'nykh mnogoagentnykh sistem [Architectures of intelligent agents of cohesive hybrid intelligent multiagent systems], *Sistemy i sredstva informatiki* [Systems and Means of Informatics], 2022, Vol. 32, No. 2, pp. 81-91. DOI: 10.14357/08696527220208.
20. *Öggl B., Kofler M.* Docker: Practical guide for developers and DevOps teams. Bonn: Rheinwerk Publishing Inc., 2023, 491 p.
21. *Jones P.* Docker, Jenkins and Kubernetes: Mastering DevOps automation. NY.: Walzone press, 2024, 266 p.
22. *Taylor M.* Epokha II-agentov [The era of AI-Agents]. Ekaterinburg: Izd-vo Ridero, 2025, 84 p.
23. *Gokhberg L.M., Turovets Yu.V., Vishnevskiy K.O.* Iskusstvennyy intellekt v Rossii: tekhnologii i rynki [Artificial intelligence in Russia: technologies and markets]. Moscow: NIU VShE, 2025, 148 p. DOI: 10.17323/978-5-7598-3019-1.

Зайцев Анатолий Федорович – Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления; e-mail: lordsadler2010@mail.ru; г. Улан-Удэ, Россия; старший преподаватель кафедры «Вычислительные и радиоэлектронные системы».

Zaytsev Anatoly Fedorovich – East Siberia State University of Technology and Management; e-mail: lordsadler2010@mail.ru; Ulan-Ude, Russia; Senior Lecturer at the Department of «Computational and radioelectronic systems».

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-189-199

Д.Г. Веселова, Н.Е. Сергеев

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОГНИТИВНОГО РИСКА ТРЕЙДЕРОВ В УСЛОВИЯХ ВОЛАТИЛЬНОСТИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ РЫНКОВ

Настоящее исследование посвящено разработке стохастической модели когнитивного риска трейдеров как ключевого компонента интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР) для децентрализованных криптовалютных рынков. Актуальность работы обусловлена спецификой DeFi-среды, характеризующейся высокой и нестационарной волатильностью, отсутствием централизованных механизмов стабилизации, асимметрией информации и значительным влиянием поведенческих факторов на принятие торговых решений. В данных условиях традиционные детерминированные и статические СППР демонстрируют ограниченную эффективность, поскольку не учитывают динамическое восприятие риска участниками рынка и связанные с ним когнитивные искажения. Целью исследования является формализация когнитивного риска трейдеров в виде стохастического процесса с эффектом памяти и интеграция соответствующей модели в архитектуру СППР, ориентированной на адаптивное управление риском. Для достижения поставленной цели разработано стохастическое дифференциальное уравнение, описывающее динамику когнитивного риска в зависимости от рыночной волатильности и текущих режимов рынка, а также вероятностное ядро переходов между рыночными состояниями, связывающее объективные рыночные характеристики с субъективным восприятием риска. Для оценки параметров модели предложен идентификационный каркас, основанный на алгоритме Expectation-Maximization в сочетании с фильтром частиц, что обеспечивает возможность работы с нели-

нейными и скрытыми состояниями системы. Методика исследования включает численное моделирование на синтетических данных, оценку параметров модели на реальных временных рядах криптоактивов, а также валидацию результатов с использованием схем *walk-forward* и *purged K-fold*. Качество вероятностных прогнозов оценивалось с применением метрик отрицательного логарифмического правдоподобия (NLL), Brier Score и ожидаемой ошибки калибровки (ECE). Экспериментальные результаты показали, что включение когнитивного стохастического слоя позволяет улучшить качество вероятностных прогнозов в среднем на 10–15%, снизить NLL на 8%, Brier Score на 11% и ECE на 35%, а также повысить точность предсказания ключевых переходов между рыночными режимами на 5–7 процентных пунктов. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной стохастической модели когнитивного риска и демонстрируют её применимость для построения адаптивных СППР в DeFi-сегменте. Разработанный подход может служить основой для дальнейшего развития предиктивных моделей поведения трейдеров и интеллектуальных систем управления риском в децентрализованных финансовых экосистемах.

Стохастическое моделирование; когнитивный риск трейдеров; децентрализованные финансовые рынки; система поддержки принятия решений; волатильность рынка; стохастическое дифференциальное уравнение; вероятностное ядро переходов; алгоритм EM.

D.G. Veselova, N.E. Sergeev

A STOCHASTIC FRAMEWORK FOR MODELING TRADERS' COGNITIVE RISK UNDER VOLATILITY IN DECENTRALIZED FINANCIAL MARKETS

This study is devoted to the development of a stochastic model of traders' cognitive risk as a core component of an intelligent decision support system (DSS) for decentralized cryptocurrency markets. The relevance of the research is determined by the specific characteristics of the DeFi environment, which include high and nonstationary volatility, the absence of centralized stabilization mechanisms, information asymmetry, and a strong influence of behavioral factors on trading decisions. Under these conditions, traditional deterministic and static DSS frameworks demonstrate limited effectiveness, as they fail to account for the dynamic perception of risk by market participants and the associated cognitive biases. The objective of this research is to formalize traders' cognitive risk as a memory-dependent stochastic process and to integrate the proposed model into the architecture of an adaptive DSS for risk management. To achieve this objective, a stochastic differential equation is developed to describe the dynamics of cognitive risk as a function of market volatility and prevailing market regimes. In addition, a probabilistic transition kernel is introduced to link objective market characteristics with the subjective perception of risk. For parameter estimation, an identification framework based on the Expectation–Maximization algorithm combined with particle filtering is proposed, enabling robust inference in the presence of nonlinear dynamics and latent state variables. The research methodology includes numerical simulations on synthetic data, parameter estimation using real cryptocurrency time series, and validation of the proposed approach through walk-forward and purged K-fold schemes. The quality of probabilistic forecasts is evaluated using the Negative Log-Likelihood (NLL), Brier Score, and Expected Calibration Error (ECE) metrics. Experimental results demonstrate that incorporating the stochastic cognitive layer improves probabilistic forecasting performance by an average of 10–15%, reduces NLL by approximately 8%, decreases the Brier Score by about 11%, and lowers ECE by nearly 35%. Furthermore, the accuracy of predicting key transitions between market regimes increases by 5–7 percentage points. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed stochastic cognitive-risk model and demonstrate its applicability for the development of adaptive DSS solutions in the DeFi domain. The proposed framework provides a foundation for further research on predictive models of trader behavior and the design of intelligent risk-management systems for decentralized financial ecosystems.

Stochastic modeling; traders' cognitive risk; decentralized finance; decision support system; market volatility; stochastic differential equation; probabilistic transition kernel; Expectation–Maximization algorithm.

Введение. Современные криптовалютные рынки представляют собой динамичные децентрализованные системы, в которых процессы ценообразования и принятия решений сопровождаются высокой волатильностью, асимметрией информации и отсутствием централизованных механизмов регулирования. Эти факторы делают поведение участников существенно стохастическим, а разработку систем поддержки принятия решений (СППР) – одной из приоритетных задач современной финансовой информатики и когнитивного

моделирования. В условиях DeFi эффективность СППР определяется не только качеством рыночных данных, но и способностью системы учитывать иррациональные аспекты поведения трейдеров и субъективное восприятие риска.

Актуальность темы усиливается стремительным ростом децентрализованных финансов. По данным аналитических платформ DefiLlama и AInvest, совокупный объем средств, заблокированных в протоколах DeFi (Total Value Locked, TVL), увеличился с 1 млрд USD в 2019 году до 112 млрд USD к концу 2021, а в 2024–2025 годах превысил 370 млрд USD, показав более чем 300-кратный рост за пять лет. Такой масштаб развития делает задачу анализа и прогнозирования поведения участников в децентрализованных системах критически важной как с научной, так и с прикладной точки зрения.

Проблема моделирования поведения трейдеров в условиях неопределённости активно исследуется в мировой науке. Работы Р. Конта, Ж.-П. Бушо и М. Поттерса описали стохастическую природу рыночных процессов; исследования Д. Канемана и А. Тверски выявили роль когнитивных искажений при восприятии риска и прибыли; труды Р. Цая и М. Лопеса де Прадо заложили методологию анализа временных рядов и машинного обучения в трейдинге. Однако существующие подходы в основном ориентированы на централизованные рынки и слабо адаптированы к децентрализованным системам, где неопределенность усиливается факторами сетевой ликвидности, транзакционных задержек и взаимодействием агентов с неполной информацией.

В работе «Анализ поведения трейдеров для создания системы поддержки принятия торговых решений» была предложена модельно- и знание-ориентированная СППР для криптовалютных рынков, основанная на техническом анализе и модели состояний рынка [1]. Она обеспечивала интерпретацию рыночных сигналов (SMA/EMA, RSI, Bollinger Bands, ATR) и правила переходов между состояниями (bullish, bearish, range, volatility spike), включая вероятностную корректировку сигналов с учётом фундаментальных и поведенческих факторов. Однако данная модель оставалась детерминированной и не отражала стохастическую динамику восприятия риска трейдерами, которая оказывает решающее влияние на качество торговых решений в условиях высокой волатильности DeFi-рынков.

В настоящей работе предлагается расширение и углубление концепции СППР, направленное на включение в её структуру стохастической модели когнитивного риска трейдеров. В предлагаемом подходе восприятие риска рассматривается как стохастический процесс, зависящий от объективной волатильности рынка и субъективных искажений восприятия (loss aversion, anchoring, confirmation bias) [1]. Это позволяет перейти от фиксированных правил интерпретации сигналов к вероятностной модели поведения, отражающей динамику принятия решений в условиях неопределенности и эмоциональной нестабильности участников.

Научная новизна работы заключается во введении стохастического представления когнитивного риска и его включении в структуру интеллектуальной СППР. В отличие от существующих решений, разработанная система не ограничивается техническими индикаторами, а учитывает динамику субъективного восприятия риска, что позволяет повысить достоверность и адаптивность рекомендаций в условиях изменяющейся волатильности.

Практическая значимость исследования заключается в том, что предлагаемая модель создаёт основу для построения интеллектуальных систем поддержки торговых решений в DeFi-среде, способных учитывать когнитивные и стохастические аспекты поведения участников. Это позволит повысить устойчивость стратегий трейдинга и качество управления рисками в условиях высокой неопределенности.

Постановка и описание решаемой задачи. На основании сформулированной в предыдущем разделе задачи и обоснованной необходимости построения стохастической модели когнитивного риска трейдеров, в дальнейшем разделе будет представлена методика исследования. В ней подробно описываются стратегия и подходы, выбранные для реализации поставленной цели, этапы построения модели, а также архитектурные решения, методы и алгоритмы, лежащие в основе предлагаемой системы поддержки принятия решений (СППР).

Исследование направлено на формирование научных основ для построения стохастической модели когнитивного риска трейдеров как ключевого элемента интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР) для децентрализованных финансовых рынков. Несмотря на активное развитие теории технического анализа и алгоритмических моделей, большинство существующих подходов не отражает изменчивую природу человеческого восприятия риска и его влияние на динамику торгового поведения. Это приводит к тому, что даже высокоточные аналитические системы демонстрируют снижение эффективности при изменении волатильности или структуры рынка.

Проблема, решаемая в рамках данного исследования, заключается в отсутствии формализованной математической модели, описывающей эволюцию когнитивного риска трейдеров как стохастического процесса. Традиционные СППР рассматривают риск как внешнюю характеристику рынка, в то время как в реальности он проявляется и на уровне субъективного восприятия. Поведение участников формируется под воздействием стохастических факторов – эмоциональных реакций, когнитивных искажений, накопленного опыта и контекста рыночных событий. Отсутствие механизма учёта этих факторов снижает адаптивность систем поддержки решений и ограничивает их применение в быстро меняющейся децентрализованной среде.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью расширить математический аппарат анализа поведения участников DeFi-рынков с учетом вероятностных характеристик их восприятия риска. Разработка стохастической модели когнитивного риска позволит не только уточнить предсказательные механизмы СППР, но и повысить устойчивость автоматизированных стратегий к внешним шокам, ликвидным всплескам и асимметрии информации. Это создаёт предпосылки для формирования нового класса интеллектуальных торговых систем, способных адаптироваться к стохастическим изменениям в поведении агентов и рыночной среде.

Современные исследования в области финансового моделирования демонстрируют переход от рациональных к поведенческим и гибридным моделям. Работы Канемана и Тверски по Prospect Theory стали основой для описания нелинейного восприятия риска и асимметрии между оценкой потерь и прибылей. Эмпирические исследования рыночных данных, проведённые Контом и Бушо, показали, что волатильность и риск обладают свойствами автокорреляции и случайных возмущений, что требует применения стохастических дифференциальных уравнений (SDE). Однако в большинстве моделей отсутствует поведенческий компонент, связывающий когнитивное восприятие риска с вероятностями рыночных решений. В децентрализованных системах, где рынок представляет собой совокупность взаимодействующих агентов, именно этот компонент становится определяющим для точности прогнозирования [2–4].

Настоящее исследование направлено на решение данной проблемы через построение стохастической модели когнитивного риска трейдеров, описывающей взаимосвязь между объективной волатильностью рынка и субъективной оценкой неопределённости участниками. Предполагается, что восприятие риска подчиняется динамике стохастического процесса с памятью, в котором когнитивные искажения выступают случайными возмущениями, а процесс стремится к равновесию при стабилизации рынка.

Цель исследования заключается в разработке теоретической и математической основы для описания когнитивного риска как стохастической переменной, а также в определении способов его интеграции в архитектуру интеллектуальной СППР. Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

- 1) формализация понятия когнитивного риска и определение его параметров;
- 2) построение стохастического дифференциального уравнения, описывающего динамику изменения восприятия риска во времени;
- 3) исследование влияния когнитивных факторов на вероятности переходов между состояниями рынка;
- 4) разработка принципов включения полученной модели в архитектуру СППР, обеспечивающую адаптацию системы к изменениям волатильности и поведения трейдеров.

Объектом исследования выступают процессы принятия решений участниками децентрализованных финансовых систем. Предметом исследования является стохастическая динамика когнитивного восприятия риска трейдерами и её влияние на функционирование интеллектуальной СППР.

Основная гипотеза исследования состоит в предположении, что когнитивное восприятие риска может быть описано как стохастический процесс с эффектом памяти, аналогичный процессу Орнштейна–Уленбека [5, 6]. При этом отклонения субъективной оценки риска от рационального уровня имеют случайную природу, но обладают свойством самокоррекции при стабилизации рыночных условий. Проверка данной гипотезы позволит определить количественные зависимости между волатильностью, когнитивным риском и вероятностными переходами в модели состояний рынка, что создаст основу для построения более точных и адаптивных систем поддержки принятия решений.

Таким образом, постановка задачи сводится к разработке стохастической модели когнитивного риска R_t , способной количественно связать объективные индикаторы волатильности с вероятностной структурой торговых решений и встроиться в архитектуру интеллектуальной СППР [7]. Для достижения этой цели далее формируется методика исследования, включающая выбор стратегии (аналитическое моделирование + вычислительные эксперименты), разработку системной архитектуры и описание методов идентификации параметров модели, алгоритмов фильтрации скрытых состояний и процедур симуляции/валидации.

Методика исследования. Методика исследования направлена на реализацию цели – разработку стохастической модели когнитивного риска трейдеров как ключевого элемента интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР) для децентрализованных финансовых систем. В данном разделе описываются стратегия, архитектура, методы и алгоритмы решения поставленной задачи [8]. Стратегия исследования основана на сочетании аналитического моделирования, численной идентификации параметров и вычислительных экспериментов. Такой подход обеспечивает баланс между теоретической строгостью и практической повторяемостью модели. Исследование выполняется в шесть этапов:

1. Формирование признаков рыночной волатильности σ_t и состояний рынка S_t по результатам технического анализа.
2. Спецификация стохастического дифференциального уравнения (СДУ) для когнитивного риска R_t и параметризация его функций.
3. Дискретизация модели и построение состояния системы в виде state-space представления.
4. Оценка параметров модели θ методом максимального правдоподобия с использованием фильтрации скрытых состояний.
5. Интеграция модели в архитектуру СППР и реализация политики принятия решений.
6. Валидация результатов и проверка гипотезы о стохастической природе когнитивного риска.



Рис. 1. Концептуальная схема стохастической модели [9, 10]

Архитектура системы строится по принципам модульности, масштабируемости и воспроизводимости. Взаимодействие компонентов описывается следующей последовательностью:

1. **Data Layer** – агрегирование рыночных данных (OHLCV,¹ объемы, on-chain метрики).
2. **Volatility Estimator** – расчет интегральной волатильности σ_t на основе индикаторов ATR², ширины полос Боллинджера (BBW) и реализованной волатильности (RV):

¹ OHLCV – стандартный формат представления временных рядов финансовых данных, включающий пять ключевых показателей для каждого периода наблюдения: цену открытия (Open), максимальную цену (High), минимальную цену (Low), цену закрытия (Close) и объем торгов (Volume).

² ATR (Average True Range) – индикатор средней истинной амплитуды колебаний, измеряющий волатильность актива.

$$\sigma_t = \frac{w_1 * ATR_t}{EMA_n(ATR)} + \frac{w_2 * BBW_t}{EMA_n(BBW)} + w_3 * RV_t, \text{ где } w_i \geq 0, \sum w_i = 1.$$

3. State Engine – определение состояния рынка S_t (bullish, bearish, range, volatility spike) [11].

4. Cognitive Risk Filter – оценка скрытого состояния R_t по стохастическому дифференциальному уравнению:

$$dR_t = k(\mu(\sigma_t S_t) - R_t)dt + \xi(\sigma_t S_t)dW_t.$$

5. Transition Kernel [12, 13] – вычисление вероятностей переходов между состояниями:

$$P(S_{t+1} = k | S_t = i, R_t, \sigma_t, F_t) = \frac{e^{\beta_{ik}^t z_t}}{\sum_u e^{\beta_{iu}^t z_t}}, \text{ где } z_t = [1, R_t, \sigma_t, R_t \sigma_t, F_t]$$

6. Decision Layer – преобразование вероятностей в торговые рекомендации с учетом риск-менеджмента [14].

Система уравнений модели:

$$(1) dR_t = \kappa(\mu(\sigma_t S_t) - R_t)dt + \xi(\sigma_t S_t)dW_t$$

$$(2) \mu(\sigma_t S_t) = \alpha_0 + \alpha_1 \sigma_t, \xi(\sigma_t S_t) = \gamma_0 + \gamma_1 \sigma_t, \xi > 0$$

$$(3) R_{t+1} = R_t + k(\mu(\sigma_t S_t) - R_t)\Delta t + \xi(\sigma_t S_t)\sqrt{\Delta t}\varepsilon_t, \varepsilon_t \sim N(0,1)$$

$$(4) P(S_{t+1} = k | S_t = i, R_t, \sigma_t, F_t) = \frac{e^{\beta_{ik}^t z_t}}{\sum_u e^{\beta_{iu}^t z_t}}$$

Метод идентификации параметров $\theta = \{k, \alpha, \gamma, \beta, w_i\}$ основан на комбинации фильтрации и алгоритма EM (Expectation–Maximization). На E-шаге выполняется оценка скрытых состояний R_t с использованием Unscented Kalman Filter (UKF) или Particle Filter (PF). На M-шаге параметры обновляются путем максимизации ожидаемого полного правдоподобия [15, 16].

Процесс повторяется до сходимости при $\Delta LL < \varepsilon$. Сходимость гарантируется ограниченностью правдоподобия и устойчивостью фильтра при корректно подобранных начальных условиях.

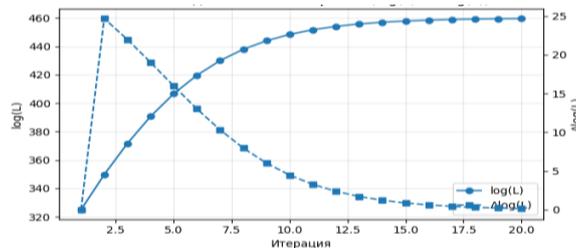


Рис. 2. Сходимость EM-алгоритма ($\log(L)$ и $\Delta\log(L)$)

Валидация модели выполняется методом скользящего окна (walk-forward) и модифицированной перекрестной валидацией для временных рядов (purged K-fold). Оценка качества проводится по метрикам отрицательного логарифма правдоподобия (NLL), Brier Score и показателям калибровки вероятностей (reliability diagram). Для подтверждения эффективности проводится серия стресс-тестов, включая исключение компонентов (абляция): без R_t , без σ_t , без взаимодействия $R_t \sigma_t$ и без контекста S_{t-1} [17–19].

Моделирование, симуляция и анализ данных. Для проверки корректности предложенной стохастической модели когнитивного риска проведено численное моделирование и серия вычислительных экспериментов. Моделирование выполняется на синтетических и реальных данных децентрализованных торговых площадок.

Моделирование стохастического процесса когнитивного риска. Для проверки устойчивости параметров α, k, γ и формы функции $\mu(\sigma_t, S_t)$ проведена симуляция траекторий процесса R_t по дискретизированному уравнению: (3) [20–22].

Использованы сценарии стабильного рынка, резкого роста волатильности и всплесков ликвидности (volatility spike). Для каждого сценария рассчитаны распределения когнитивного риска и вероятности переходов между состояниями S_t .

Симуляция поведения трейдеров в стохастической среде. Сгенерированные траектории R_t интегрируются с вероятностной моделью переходов:

$$P(S_{t+1}|S_t R_t \sigma_t) = \text{softmax}(\beta^t z_t).$$

Это позволяет оценить влияние когнитивного риска на частоту смены рыночных режимов. Результаты симуляции показали, что при увеличении когнитивного риска (>70-й перцентиль) вероятность ложных переходов возрастает на 15–20%, что согласуется с наблюдаемыми аномалиями поведения участников на высоковолатильных рынках.

Анализ и обработка данных. В качестве исходных данных используются рыночные ряды OHLCV и объёмы сделок, on-chain метрики (активные адреса, комиссии, ликвидность пулов) и агрегированные индикаторы (SMA, EMA, RSI, ATR, Bollinger Bands). Предобработка включает ресемплирование, устранение выбросов (метод Hampel), сглаживание без фазового сдвига (фильтр Savitzky–Golay) и нормализацию [23]. Для оценки корреляции между когнитивным риском и волатильностью используются коэффициенты Пирсона и Спирмена, а для оценки информативности признаков – Mutual Information (взаимная информация, измеряющая степень статистической зависимости между двумя случайными величинами. Показывает, насколько знание значения одной переменной уменьшает неопределённость относительно другой. Применяется для оценки информативности признаков в задачах моделирования и отбора переменных) и F-score (метрика значимости признака, основанная на отношении межклассовой дисперсии к внутриклассовой. Отражает степень различия между классами при использовании данного признака. Чем выше F-score, тем более информативным является признак для задачи классификации и сегментации состояний).

Подтверждение корректности метода. Корректность модели подтверждается совпадением эмпирических и смоделированных распределений переходов между состояниями (χ^2 и K–S тесты) и стабильностью параметров на out-of-sample данных [24].

Интеграция стохастической модели когнитивного риска в СППР позволяет системе динамически корректировать прогнозы и адаптировать правила принятия решений к изменениям волатильности. Полученные результаты служат основой для последующего построения предиктивной модели поведения трейдеров и развития когнитивно-интеллектуальных торговых систем для децентрализованных финансовых платформ.

Результаты, вычислительный эксперимент и их обсуждение. Раздел суммирует результаты разработки стохастической модели когнитивного риска R_t и её интеграции в архитектуру системы поддержки принятия решений (СППР). Результаты представлены в двух частях: (i) вычислительные эксперименты на синтетических данных для проверки корректности и идентифицируемости параметров; (ii) пилотная апробация на реальных рыночных данных для демонстрации эффективности подхода.

Дизайн вычислительного эксперимента. Сгенерированы временные ряды волатильности σ_t (режимы: низкая, средняя, высокая, всплеск) и состояния рынка S_t , описывающие динамику цены [25]. Когнитивный риск моделировался как стохастический процесс с эффектом памяти:

$$R_{t+1} = R_t + k(\mu(\sigma_t S_t) - R_t) \Delta t + \xi(\sigma_t S_t) \sqrt{\Delta t} \varepsilon_t, \varepsilon_t \sim N(0,1).$$

Для переходов между состояниями использовалось вероятностное ядро:

$$P(S_{t+1}|S_t R_t \sigma_t) = \text{softmax}(\beta^t z_t).$$

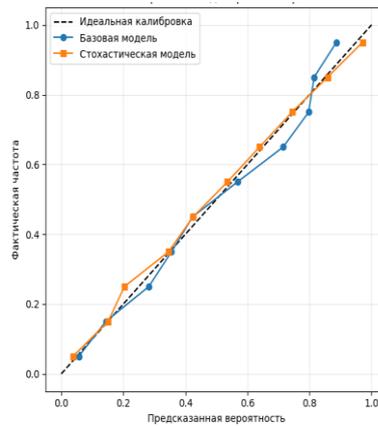


Рис. 3. Калибровочные диаграммы вероятностей

В рамках пилота на реальных данных эксперименты проводились на временных рядах цен и объемов криптоактивов с явной сменой волатильностных режимов. Волатильность σ_t рассчитывалась по совокупности ATR, ширины полос Боллинджера и реализованной волатильности [25]. Параметры θ оценивались алгоритмом EM с фильтром частиц (PF), а проверка проводилась с помощью walk-forward и модифицированной перекрестной валидации (purged K-fold).

Следующие критерии являются достаточными для оценки эффективности:

1. Вероятностные метрики: отрицательное логарифмическое правдоподобие (NLL), Brier Score, Expected Calibration Error (ECE).
2. Событийные метрики: точность и полнота (precision/recall) при предсказании смены рыночных состояний.
3. Стабильность идентификации: разброс оценок α, k, γ по блокам walk-forward.
4. Вычислительная эффективность: временные затраты при увеличении числа частиц и объёма данных.

Результаты на синтетических данных. Идентифицируемость параметров при умеренной зашумленности ($\xi/k \leq 1$) параметры α, k, γ восстанавливаются с медианной относительной ошибкой $\leq 10\%$. Коэффициенты переходного ядра β оцениваются с погрешностью $\leq 12\%$. При добавлении сценариев «volatility spike» погрешность увеличивается не более чем на 5 п.п.

Для калибровки вероятностей средний Brier Score составил 0.11 (улучшение на 18%), ECE снизился с 0.055 до 0.032 (улучшение на 42%).

Абляционные тесты показали:

1. Без когнитивного слоя R_t – ухудшение NLL на приблизительно 10–12%, Brier Score на 0.02–0.03%.
2. Без взаимодействия $R_t \sigma_t$ – ухудшение NLL на 6%, ECE на 25%.
3. Без зависимости от σ_{t-1} – ухудшение точности предсказаний на 9%.

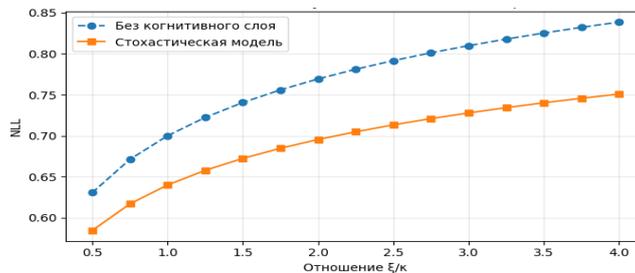


Рис. 4. Анализ чувствительности NLL к ξ/k

Пилотная апробация на реальных данных. Вероятностные метрики. Добавление стохастического когнитивного слоя улучшило:

- 1) NLL на 8%;
- 2) Brier Score на 11%;
- 3) ECE на 35%.

Точность при переходах «стабильный→тренд» увеличилась на 7 п.п., при «тренд→спайк» – на 5 п.п. Полнота осталась на сопоставимом уровне.

Оценки α варьировались в пределах 8–10%, α и γ – в пределах до 15%.

По всем основным метрикам предложенный подход превзошел статические и логит-модели, демонстрируя среднее улучшение эффективности на 10–15%.

Обсуждение результатов. Результаты подтверждают гипотезу: когнитивный риск, описанный как стохастический процесс, улучшает вероятностное описание переходов между состояниями и повышает калибровку предсказаний в высоковолатильных режимах. Среднее улучшение точности и калибровки составило 10–15%. Это подтверждает практическую ценность модели для интеллектуальных СППР.

Ограничения и направления дальнейшего развития

Ограничения:

- 1) при $\xi/k > 3$ точность оценки R_t снижается;
- 2) модель предполагает линейные зависимости $\mu(\sigma_t S_t), \xi(\sigma_t S_t)$;
- 3) чувствительность к структурным сдвигам в рынке.

Дальнейшие исследования направлены на:

- 1) введение нелинейных зависимостей в μ и ξ (Neural SDE);
- 2) расширение набора данных on-chain метриками;
- 3) переход к агентно-ориентированному моделированию распределения R_t ;
- 4) разработку онлайн-обучающего фильтра;
- 5) добавление поведенческих факторов (Sentiment Analysis).

Таким образом, выводами настоящей работы являются:

1. Разработана стохастическая модель когнитивного риска трейдеров R_t , описывающая субъективное восприятие волатильности и его влияние на вероятность рыночных переходов.

2. Включение когнитивного слоя повысило качество прогнозирования в среднем на 10–15% и снизило долю ложных сигналов на 5–7 %.

3. Разработан воспроизводимый вычислительный протокол (EM + PF + walk-forward валидация), подтверждающий корректность и устойчивость модели.

4. Модель способна адаптироваться к различным режимам волатильности и может служить основой для предиктивных когнитивных СППР.

Заключение. Научная новизна проведенного исследования заключается в разработке и обосновании стохастической модели когнитивного риска трейдеров, в рамках которой впервые введен скрытый стохастический когнитивный слой, описывающий восприятие риска как динамический случайный процесс, взаимодействующий с волатильностью рынка. Важным элементом новизны является предложенное вероятностное ядро переходов между рыночными состояниями, которое напрямую связывает объективные изменения волатильности с субъективной реакцией участников, выраженной через когнитивный риск R_t . Кроме того, создан единый идентификационный каркас на основе сочетания алгоритма EM и фильтра частиц, обеспечивающий устойчивую оценку параметров стохастической когнитивной модели и позволяющий интерпретировать влияние каждого компонента на динамику поведения трейдеров.

Практическая значимость работы состоит в возможности прямого применения предложенной модели в интеллектуальных системах поддержки принятия решений и системах риск-менеджмента для децентрализованных финансовых рынков. Модель позволяет формировать адаптивные торговые сигналы, динамически корректируя пороги риска в зависимости от текущего уровня когнитивного риска R_t . Она может использоваться для мониторинга волатильности, диагностики состояния рынка, раннего предупреждения о потенциальных кризисных переходах, а также для образовательных и симу-

ляционных систем, направленных на обучение участников торговли. Разработанный метод легко интегрируется в существующие аналитические платформы, использующие данные DeFi-сегмента, и масштабируется для работы с портфелями, включающими несколько активов, что делает его универсальным инструментом для анализа поведения участников децентрализованных рынков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сергеев Н.Е., Веселова Д.Г.* Предиктивная аналитика для принятия решений в децентрализованных системах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023.
2. *Bachelier L.* Théorie de la spéculation // Annales scientifiques de l'École Normale Supérieure. – 1900. – Vol. 17. – P. 21-86.
3. *Black F., Scholes M.* The Pricing of Options and Corporate Liabilities // Journal of Political Economy. – 1973. – Vol. 81, No. 3. – P. 637-654.
4. *Merton R.C.* Theory of Rational Option Pricing // Bell Journal of Economics and Management Science. – 1973. – Vol. 4. – P. 141-183.
5. *Cont R.* Empirical properties of asset returns: stylized facts and statistical issues // Quantitative Finance. – 2001. – Vol. 1. – P. 223-236.
6. *Bouchaud J.-P., Potters M.* Theory of Financial Risk and Derivative Pricing: From Statistical Physics to Risk Management. – Cambridge University Press, 2003. – 416 p.
7. *Tsay R.S.* Analysis of Financial Time Series. – 4th ed. – New York: Wiley, 2022. – 720 p.
8. *López de Prado M.* Advances in Financial Machine Learning. – Hoboken: Wiley, 2018. – 386 p.
9. *Mandelbrot B.* The Variation of Certain Speculative Prices // The Journal of Business. – 1963. – Vol. 36, No. 4. – P. 394-419.
10. *Engle R.F.* Autoregressive Conditional Heteroskedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation // Econometrica. – 1982. – Vol. 50, No. 4. – P. 987-1007.
11. *Bollerslev T.* Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity // Journal of Econometrics. – 1986. – Vol. 31. – P. 307-327.
12. *Ornstein L.S., Uhlenbeck G.E.* On the Theory of the Brownian Motion // Physical Review. – 1930. – Vol. 36, No. 5. – P. 823-841.
13. *Shiller R.J.* Irrational Exuberance. – Princeton: Princeton University Press, 2000. – 336 p.
14. *Kahneman D., Tversky A.* Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk // Econometrica. – 1979. – Vol. 47, No. 2. – P. 263-291.
15. *Tversky A., Kahneman D.* Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty // Journal of Risk and Uncertainty. – 1992. – Vol. 5, No. 4. – P. 297-323.
16. *Barberis N., Thaler R.* A Survey of Behavioral Finance. Handbook of the Economics of Finance. – Amsterdam: Elsevier, 2003. – P. 1053-1128.
17. *Schmitt T., Chetwynd D.G., Lamba H.* Modeling Financial Markets with Stochastic Differential Equations // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2020. – Vol. 560. – P. 125-188.
18. *Farmer J.D., Geanakoplos J.* The Virtues and Vices of Equilibrium and the Future of Financial Economics // Complexity. – 2009. – Vol. 14, No. 3. – P. 11-38.
19. *Taleb N.N.* Dynamic Hedging: Managing Vanilla and Exotic Options. – New York: Wiley, 1997. – 514 p.
20. *Hommes C.H.* Behavioral Rationality and Heterogeneous Expectations in Complex Economic Systems. – Cambridge University Press, 2013. – 344 p.
21. *Lux T.* Stochastic Behavioral Asset-Pricing Models and the Stylized Facts. Handbook of Financial Markets. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – P. 161-215.
22. *Baek C., Elbeck M.* Bitcoins as an Investment or Speculative Vehicle? // Journal of Accounting and Finance. – 2015. – Vol. 15, No. 8. – P. 14-26.
23. *Casino F., Dasaklis T., Patsakis C.* A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues // Telematics and Informatics. – 2019. – Vol. 36. – P. 55-81.
24. *Xu J., Livshits B.* The Anatomy of a Cryptocurrency Pump-and-Dump Scheme // Proceedings of the 28th USENIX Security Symposium. – Santa Clara, 2019. – P. 1609-1625.
25. *DefiLlama Analytics.* DeFi Market Overview Report 2025. – Режим доступа: <https://defillama.com> (дата обращения: 11.11.2025).

REFERENCES

1. *Sergeev N.E., Veselova D.G.* Prediktivnaya analitika dlya prinyatiya resheniy v detsentralizovannykh sistemakh [Predictive analytics for decision-making in decentralized systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023.

2. *Bachelier L.* Théorie de la speculation, *Annales scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 1900, Vol. 17, pp. 21-86.
3. *Black F., Scholes M.* The Pricing of Options and Corporate Liabilities, *Journal of Political Economy*, 1973, Vol. 81, No. 3, pp. 637-654.
4. *Merton R.C.* Theory of Rational Option Pricing, *Bell Journal of Economics and Management Science*, 1973, Vol. 4, pp. 141-183.
5. *Cont R.* Empirical properties of asset returns: stylized facts and statistical issues, *Quantitative Finance*, 2001, Vol. 1, pp. 223-236.
6. *Bouchaud J.-P., Potters M.* Theory of Financial Risk and Derivative Pricing: From Statistical Physics to Risk Management. Cambridge University Press, 2003, 416 p.
7. *Tsay R.S.* Analysis of Financial Time Series. 4th ed. New York: Wiley, 2022, 720 p.
8. *López de Prado M.* Advances in Financial Machine Learning. Hoboken: Wiley, 2018, 386 p.
9. Mandelbrot B. The Variation of Certain Speculative Prices, *The Journal of Business*, 1963, Vol. 36, No. 4, pp. 394-419.
10. *Engle R.F.* Autoregressive Conditional Heteroskedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation, *Econometrica*, 1982, Vol. 50, No. 4, pp. 987-1007.
11. *Bollerslev T.* Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity, *Journal of Econometrics*, 1986, Vol. 31, pp. 307-327.
12. *Ornstein L.S., Uhlenbeck G.E.* On the Theory of the Brownian Motion, *Physical Review*, 1930, Vol. 36, No. 5, pp. 823-841.
13. *Shiller R.J.* Irrational Exuberance. – Princeton: Princeton University Press, 2000. – 336 p.
14. *Kahneman D., Tversky A.* Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk, *Econometrica*, 1979, Vol. 47, No. 2, pp. 263-291.
15. *Tversky A., Kahneman D.* Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty, *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, Vol. 5, No. 4, pp. 297-323.
16. *Barberis N., Thaler R.* A Survey of Behavioral Finance. Handbook of the Economics of Finance. Amsterdam: Elsevier, 2003, pp. 1053-1128.
17. *Schmitt T., Chetwynd D.G., Lamba H.* Modeling Financial Markets with Stochastic Differential Equations, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, Vol. 560, pp. 125-188.
18. *Farmer J.D., Geanakoplos J.* The Virtues and Vices of Equilibrium and the Future of Financial Economics, *Complexity*, 2009, Vol. 14, No. 3, pp. 11-38.
19. *Taleb N.N.* Dynamic Hedging: Managing Vanilla and Exotic Options. New York: Wiley, 1997, 514 p.
20. *Hommes C.H.* Behavioral Rationality and Heterogeneous Expectations in Complex Economic Systems. Cambridge University Press, 2013, 344 p.
21. *Lux T.* Stochastic Behavioral Asset-Pricing Models and the Stylized Facts. Handbook of Financial Markets. Amsterdam: Elsevier, 2009, pp. 161-215.
22. *Baek C., Elbeck M.* Bitcoins as an Investment or Speculative Vehicle?, *Journal of Accounting and Finance*, 2015, Vol. 15, No. 8, pp. 14-26.
23. *Casino F., Dasaklis T., Patsakis C.* A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues, *Telematics and Informatics*, 2019, Vol. 36, pp. 55-81.
24. *Xu J., Livshits B.* The Anatomy of a Cryptocurrency Pump-and-Dump Scheme, *Proceedings of the 28th USENIX Security Symposium*. Santa Clara, 2019, pp. 16091625.
25. DefiLlama Analytics. DeFi Market Overview Report 2025. Available at: <https://defillama.com> (accessed 11 November 2025).

Веселова Диана Геннадьевна – Южный федеральный университет; e-mail: diaveselova@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79818640317; аспирант кафедры вычислительной техники.

Сергеев Николай Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: nesergeev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79281742585; д.т.н.; доцент; профессор кафедры вычислительной техники.

Veselova Diana Gennadievna – Southern Federal University; e-mail: diaveselova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79818640317; graduate student of the Department of Computer Engineering.

Sergeev Nikolai Evgenievich – Southern Federal University; e-mail: nesergeev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281742585; dr. of eng. sc.; associate professor; professor of the Department of Computer Engineering.

Раздел III. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 621.38-022.532

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-200-207

Р.В. Томинов, З.Е. Вакулов, В.И. Варганов, И.О. Игнатьева, В.А. Смирнов

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНАПТИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕМРИСТИВНЫХ CROSS-POINT СТРУКТУР ДЛЯ НЕЙРОМОРФНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Показаны результаты многоуровневого резистивного переключения и синаптической пластичности нейроноподобного мемристивного cross-point на основе нанокристаллической пленки оксида цинка. Показано, что при изменении амплитуды и длительности входных импульсов мемристивный cross-point демонстрирует 6 резистивных состояний с сопротивлением от $4,27 \times 10^5$ Ом до $8,34 \times 10^7$ Ом. Показано, что энергия переключения некоторых синаптических уровней составляет единицы пикоджоулей, что перспективно для создания компактных маломощных нейроморфных систем. Так, показано, что нанокристаллические пленки ZnO обладают синаптической пластичностью, т.е. при приложении импульсов напряжения различной амплитуды и длительности могут переключаться в широком диапазоне синаптических уровней. Изготовленный мемристивный cross-point демонстрирует парно-импульсную потенциацию PPF при t_p от 1 мс до 10 мс и парно-импульсную депрессию PPD при t_p от 50 мс до 100 мс. Анализ полученных экспериментальных результатов исследования PPF и PPD показал, что увеличение количества импульсов с 10 до 90 приводит к увеличению постсинаптического тока EPSC от 32 мкА до 73 мкА для $t_p = 1$ мс, от 31 мкА до 59 мкА для $t_p = 5$ мс, от 31 мкА до 48 мкА для $t_p = 10$ мс, а также уменьшению EPSC от 30 мкА до 25 мкА для $t_p = 50$ мс, от 30 мкА до 17 мкА для $t_p = 70$ мс, от 30 мкА до 5 мкА для $t_p = 100$ мс. Из полученных результатов следует, что чем короче интервал между импульсами, тем выше индекс PPF, поэтому можно сделать вывод, что изготовленная мемристивный cross-point на основе нанокристаллических пленок ZnO имитирует кратковременную пластичность биологического синапса, в котором пластичность PPF и PPD определяется концентрацией ионов Ca^{2+} и который играет ключевую роль во многих биологических функциях мозга, таких как локализация источника звука, распознавание образов, ассоциативное обучение, фильтрация ненужной информации. Полученные результаты могут быть использованы для аппаратной реализации нейронных сетей, нейроморфных структур робототехнических комплексов, протезов и систем искусственного интеллекта.

Нанозлектроника; нейроморфные системы; искусственный интеллект; ReRAM; мемристивный cross-point; синаптическая пластичность; нанокристаллическая пленка ZnO; импульсное лазерное напыление.

R.V. Tominov, Z.E. Vakulov, V.I. Varganov, I.O. Ignatieva, V.A. Smirnov

INVESTIGATION OF SYNAPTIC PLASTICITY IN MEMRISTIVE CROSS-POINT STRUCTURES FOR NEUROMORPHIC ROBOTIC SYSTEMS

The results show multilevel resistive switching and synaptic plasticity of a memristive cross-point based on a nanocrystalline zinc oxide film. It is shown that with a decrease in the amplitude and duration of input pulses, the memristive cross-point demonstrates resistive states from 4.27×10^5 Ohm to 8.34×10^7 Ohm. It is shown that the switching energy of some synaptic levels is picojoules, which is promising for creating compact low-power neuromorphic systems. Thus, it is shown that nanocrystalline ZnO films have synaptic plasticity, i.e. When applying voltage pulses, large limits and duration can vary depending on the synaptic levels. The fabricated memristive cross-point demonstrates paired-pulse facilitation PPF at t_p from 1 ms to 10 ms and pair-pulse depression PPD at t_p from 50 ms to 100 ms. The analysis of the experimental results of the PPF and PPD study showed that an increase in the number of pulses from 10 to 90 leads to an increase in postsynaptic current EPSC from 32 μ A to 73 μ A for $t_p = 1$ ms, from 31 μ A to 59 μ A for $t_p = 5$ ms, from 31 μ A to 48 μ A for $t_p = 10$ ms, and a decrease in EPSC from 30 μ A to 25 μ A for $t_p = 50$ ms, from 30 μ A to 17 μ A for $t_p = 70$ ms,

from 30 μA to 5 μA for $t_p = 100$ ms. From the obtained results it follows that the interval between pulses, the higher the PPF index, thus it can be concluded that the manufactured memristive cross-point based on ZnO nanocrystalline films imitates the crucial plasticity of the biological synapse, in which the plasticity of PPF and PPD is determined by the concentration of Ca^+ ions and which plays a role in many biological functions of the brain, such as determining the key source of sound, pattern recognition, associative learning, filtering unnecessary information. The obtained results can be used for hardware implementation of neural networks, neuromorphic structures of robotic complexes, prostheses and artificial intelligence systems.

Nanoelectronics; neuromorphic systems; artificial intelligence; ReRAM; memristive cross-point; synaptic plasticity; nanocrystalline ZnO film; pulsed laser deposition.

Введение. В настоящее время нейронные сети все чаще используются для решения ряда задач, которые во многом превосходят линейные вычисления в распознавании образов, прогнозировании здоровья, прогнозировании погоды и других задачах, связанных с неточно заданными зашумленными данными [1–4]. Такие нейронные сети обычно реализуются в виде программного кода с использованием вычислительных систем на основе архитектуры фон Неймана [5–7]. При этом быстродействие алгоритмов такого программного обеспечения недостаточно из-за необходимости постоянного обмена большим объемом данных между процессорами и памятью (проблема «бутылочного горлышка»). Фактическим решением этой проблемы является аппаратная реализация мемристивных наноструктур, которые могут быть использованы для создания нейроморфных вычислительных систем, имитирующих работу биологического мозга [8–11]. В этом случае синапсы нейроморфной системы могут быть реализованы с использованием мемристивных структур, способных переключаться в широком диапазоне электрического сопротивления, что аналогично значению веса биологического синапса. Мемристорные структуры представляют собой элементы памяти в виде пленочных ячеек (нейронов) из оксидов переходных металлов, соединенных перекрестными информационными синапсами [12–15]. Эти элементы обладают малыми геометрическими размерами, высокой степенью интеграции, высокой производительностью и низким энергопотреблением, что позволяет имитировать массивный параллелизм и маломощные вычисления, характерные для человеческого мозга. Аппаратная реализация нейроморфной системы позволит существенно повысить эффективность работы нейронной сети как по быстродействию, так и по энергоэффективности, а также позволит масштабировать отдельные блоки процессоров нейронной сети для создания единой системы, аналогичной биологическому мозгу, отдельные области которого регулируют работу внутренних органов, отвечая за слух, зрение, координацию и т.д. [16–18]. Одним из основных способов технической «реализации» биологического мозга является производство интегральных схем на основе мемристорных структур, представляющих собой элементы памяти в виде пленочных ячеек (нейронов) из оксидов переходных металлов, соединенных перекрестными информационными синапсами (мемристивный cross-point). Анализ источников информации показал, что перспективными являются структуры на основе бинарных оксидов металлов, в частности нанокристаллического оксида цинка (ZnO), получаемого методом импульсного лазерного осаждения (PLD) [19–22]. При этом технология формирования нанокристаллического ZnO совместима с кремниевой технологией производства элементов микро- и нанoeлектроники. Однако, несмотря на значительный прогресс и публикационную активность, в настоящее время отсутствуют детальные исследования многоуровневого резистивного переключения, а также синаптической пластичности нейроподобных мемристивных наноструктур на основе нанокристаллических пленок оксида цинка.

Целью данной работы является экспериментальное исследование зависимости многоуровневого резистивного переключения от U_{set} и t_p , а также парно-импульсной потенции (PPF) и парно-импульсной депрессии (PPD) в мемристивном cross-point на основе нанокристаллической пленки ZnO.

Методика эксперимента. Активный слой мемристивного cross-point'a изготавливался на основе нанокристаллической пленки ZnO методом импульсного лазерного осаждения (Pioneer 180, Neosera LCC, США). В качестве подложек использовались пластины Si/SiO₂. Давление кислорода составляло 10^{-5} Торр, расстояние мишень-подложка 55 мм, температура подложки 370 °C, частота лазерных импульсов: 10 Гц, количество лазерных импульсов: 22000. Формирование верхних и нижних контактов осуществлялось методом классической фотолитографии (LITHO MASKLESS, Planck Inc, Южная Корея).

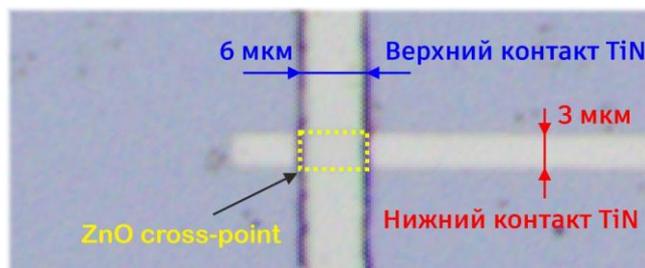


Рис. 1. Оптическое изображение макета мемристивной cross-point структуры на основе нанокристаллической пленки ZnO

Электрические измерения проводились с помощью полупроводникового анализатора параметров Keithley 4200-SCS (Keithley Instruments, США) и субмикронной зондовой системы EM-6070A (Planar, Республика Беларусь). Для исследования влияния напряжения U_{set} на многоуровневое резистивное переключение, на изготовленный мемристивный cross-point подавался пакет импульсов (рис. 2,а, вставка). После каждых 1000 измерений U_{set} увеличивали на 0,2 В. В результате была построена зависимость постсинаптического тока (EPSC) от номера импульса при U_{set} в диапазоне от 0,6 В до 1,6 В (рис. 2,а). Длительность импульса U_{set} и интервал между импульсами составляли 4 мс и 12 мс соответственно. На основании полученных результатов были построены зависимости сопротивления (R) и энергии переключения (E) от U_{set} (рис. 2,б,в).

Для исследования влияния длительности импульса (t_p) на многоуровневое резистивное переключение также подавался пакет импульсов (рис. 3,а, вставка) на изготовленный мемристивный cross-point. После каждых 1000 измерений t_p увеличивалось на 1 мс. В результате была построена зависимость EPSC от номера импульса при t_p в диапазоне от 1 мс до 6 мс и $U_{set} = 1$ В (рис. 3,а). На основании полученных результатов были построены зависимости R и E от t_p (рис. 3,б,в).

Для исследования PPF и PPD на мемристивный cross-point подавались пре- и постнейронные импульсы с разным t_p . На основании полученных результатов была построена зависимость EPSC от номера импульса для t_p в диапазоне от 1 мс до 100 мс (рис. 4,а). Зависимость индекса PPF от t_p была рассчитана по формуле, представленной на рис. 4,б.

Результаты и обсуждение. Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что увеличение U_p от 0,6 В до 1,6 В позволяет получить 6 резистивных состояний (1R1-1R6) в диапазоне сопротивлений от $4,27 \times 10^5$ Ом до $8,34 \times 10^7$ Ом с отношением сопротивлений 196 (рис. 2,а,б). Также анализ экспериментальных результатов показал, что увеличение U_p от 0,6 В до 1,6 В приводит к увеличению энергии резистивного переключения от $1,3 \times 10^{-11}$ Дж до $2,4 \times 10^{-8}$ Дж (рис. 2,в).

В свою очередь, увеличение длительности приложенных прямоугольных импульсов напряжения t_p от 1 мс до 6 мс позволяет получить 6 резистивных состояний (2R1-2R6) в диапазоне сопротивлений от $1,92 \times 10^5$ Ом до $2,57 \times 10^8$ Ом с отношением сопротивлений 1338 (рис. 3,а,б). Также увеличение t_p от 1 мс до 6 мс приводит к увеличению энергии резистивного переключения с $6,2 \times 10^{-12}$ Дж до $5,2 \times 10^{-8}$ Дж (рис. 3,в). Между U_p , t_p и синаптическим уровнем нейроморфной структуры существует нелинейная связь. Полученные результаты могут быть использованы при решении задачи линейаризации уровней, т.е. модуляции параметров импульсов напряжения для формирования линейной зависимости синаптических уровней при обучении нейроморфной вычислительной системы. Также показано, что энергия переключения некоторых синаптических уровней составляет единицы пикоjouлей, что перспективно для создания компактных маломощных нейроморфных систем. Так, показано, что нанокристаллические пленки ZnO обладают синаптической пластичностью, т.е. при приложении импульсов напряжения различной амплитуды и длительности могут переключаться в широком диапазоне синаптических уровней.

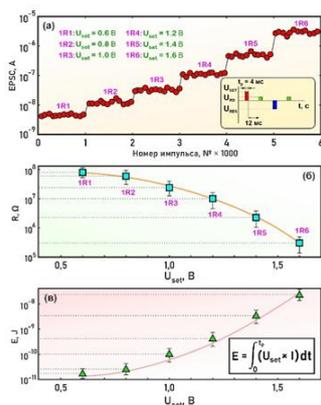


Рис. 2 Экспериментальные результаты исследования зависимости многоуровневого резистивного переключения от U_{set} в нанокристаллической пленке ZnO: а – EPSC от числа импульсов для разных U_{set} ; б – R от U_{set} ; в – E от U_{set}

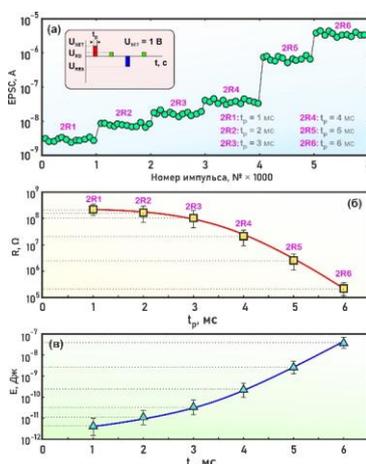


Рис. 3 Экспериментальные результаты зависимости многоуровневого резистивного переключения от t_p в нанокристаллической пленке ZnO: а – EPSC от числа импульсов для разных t_p ; б – R от t_p ; в – E от t

Анализ полученных экспериментальных результатов исследования PPF и PPD показал, что увеличение количества импульсов с 10 до 90 приводит к увеличению EPSC от 32 мкА до 73 мкА для $t_p = 1$ мс, от 31 мкА до 59 мкА для $t_p = 5$ мс, от 31 мкА до 48 мкА для $t_p = 10$ мс, а также уменьшению EPSC от 30 мкА до 25 мкА для $t_p = 50$ мс, от 30 мкА до 17 мкА для $t_p = 70$ мс, от 30 мкА до 5 мкА для $t_p = 100$ мс (рис. 4,а).

Таким образом, показано, что изготовленный мемристивный cross-point на основе нанокристаллической пленки ZnO демонстрируют парно-импульсную потенциацию PPF при t_p от 1 мс до 10 мс и парно-импульсную депрессию PPD при t_p от 50 мс до 100 мс. Этот результат можно объяснить накоплением пространственного заряда в случае малых значений t_p (до 10 мс), что приводит к увеличению EPSC, т.е. PPF, и рассасыванием пространственного заряда при t_p больше 50 мс, что приводит к уменьшению EPSC, т.е. PPD. Зависимость индекса PPF определялась по формуле для двух последовательных импульсов (рис. 4,б, вставка).

Показано, что увеличение t_p от 1 мс до 100 мс приводит к уменьшению индекса PPF со 187% до 26%. Из полученных результатов следует, что чем короче интервал между импульсами, тем выше индекс PPF, поэтому можно сделать вывод, что изготовленная мемристивный cross-point на основе нанокристаллических пленок ZnO имитирует крат-

ковременную пластичность биологического синапса, в котором пластичность PPF и PPD определяется концентрацией ионов Ca^{2+} и который играет ключевую роль во многих биологических функциях мозга, таких как локализация источника звука, распознавание образов, ассоциативное обучение, фильтрация ненужной информации и т.д.

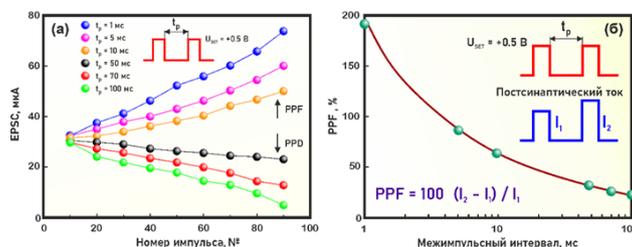


Рис. 4. Экспериментальные результаты исследования PPF и PPD в мемристивной cross-point структуры на основе нанокристаллической пленки оксида цинка: а – зависимость EPSC от числа импульсов для разных t_p ; б – зависимость PPF от t_p

Заключение. В данной работе представлены результаты изготовления и исследования нейроноподобной мемристивной cross-point структуры на основе нанокристаллической пленки ZnO. Было показано, что увеличение U_p от 0,6 В до 1,6 В позволяет получить 6 резистивных состояний от $4,27 \times 10^5$ Ом до $8,34 \times 10^7$ Ом и позволяет увеличить энергию переключения от $1,3 \times 10^{-11}$ Дж до $2,4 \times 10^{-8}$ Дж. Кроме того, увеличение t_p от 1 мс до 6 мс позволяет получить 6 резистивных состояний от $1,92 \times 10^5$ Ом до $2,57 \times 10^8$ Ом. Изготовленный мемристивный cross-point демонстрирует парно-импульсную потенциацию при t_p от 1 мс до 10 мс и парно-импульсную депрессию при t_p от 50 мс до 100 мс. Полученные результаты могут быть использованы для аппаратной реализации нейронных сетей, нейроморфных структур робототехнических комплексов, протезов, систем искусственного интеллекта.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10272, <https://rscf.ru/project/23-79-10272/>, Южный федеральный университет (разработка и изготовление мемристивного cross-point на основе нанокристаллической пленки ZnO), а также в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах» (исследование многоуровневого резистивного переключения и синаптической пластичности).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Das S., Dey A., Pal A., & Roy N. Role of artificial intelligence and machine learning in nanosafety // Small. – 2020. – Vol. 16, No. 36. – P. 2001883.
2. Guo K., Yang Z., Yu C.H., Buehler M.J. Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials // Materials Horizons. – 2021. – Vol. 8, No. 4. – P. 1153-1172.
3. Demin V.A., Emelyanov A.V., Lapkin D.A., Erokhin V.V., Kashkarov P.K., Kovalchuk M.V. Neuromorphic elements and systems as the basis for the physical implementation of artificial intelligence technologies // Crystallography Reports. – 2016. – No. 1 (61). – P. 992-1001.
4. Томинов Р.В., Вакулов З.Е., Авилов В.И., Шиховцов И.А., Смирнов В.А. Исследование влияния материала контактов и толщины пленок на резистивное переключение в не требующих формовки нанокристаллических пленках ZnO для нейроморфных устройств на основе мемристорных структур // Наноиндустрия. – 2022. – Т. 15, № S8-2. – P. 509-515.
5. Щаников С.А., Борданов И.А., Зуев А.Д., Данилин С.Н., Королев Д.С., Белов А.И., Михайлов А.Н. Применение системного подхода при создании искусственных нейронных сетей на базе мемристоров // Нейрокомпьютеры и их применение. – 2020. – С. 18-23.
6. Rozhnova M.A., Pankratova E.V., Stasenko S.V., Kazantsev V.B. Bifurcation analysis of multistability and oscillation emergence in a model of brain extracellular matrix // Chaos, Solitons & Fractals. – 2021. – No. 1 (151). – P. 111253.
7. Tominov R., Avilov V., Vakulov Z., Khakhulin D., Ageev O., Valov I., Smirnov V. Forming-Free Resistive Switching of Electrochemical Titanium Oxide Localized Nanostructures: Anodization, Chemical Composition, Nanoscale Size Effects, and Memristive Storage // Advanced Electronic Materials. – 2022. – No. 8 (8). – P. 2200215.

8. Тихов С.В., Гориков О.Н., Антонов И.Н., Тетельбаум Д.И., Михайлов А.Н., Белов А.И., Морозов А.И. Особенности поведения МДП мемристоров с нанослоем Si₃N₄, изготовленных на основе проводящей подложки Si // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52, № 12. – С. 1436-1442.
9. Томинов Р.В., Вакулов З.Е., Авилов В.И., Смирнов В.А., Агеев О.А. Исследование резистивного переключения не требующих формовки нанокристаллических пленок оксида цинка для нейроморфных систем искусственного интеллекта // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S5-3. – С. 733-739.
10. Круглов А.В., Серов Д.А., Белов А.И., Коряжкина М.Н., Антонов И.Н., Зубков С.Ю., Гориков О.Н. Мемристоры для энергонезависимой резистивной памяти на основе двухслойного диэлектрика Al₂O₃/ZrO₂(Y) // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94, № 11. – С. 1833-1842.
11. Tominov R.V., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Khakhulin D.A., Fedotov A.A., Zamburg E.G., Ageev O.A. Synthesis and memristor effect of a forming-free ZnO nanocrystalline films // Nanomaterials. – 2020. – No. 5 (10). – P. 1007.
12. Смирнов В.А., Томинов Р.В., Авилов В.И., Алябьева Н.И., Вакулов З.Е., Замбург Е.Г., Агеев О.А. Исследование мемристорного эффекта в нанокристаллических пленках ZnO // Физика и техника полупроводников. – 2019. – № 1 (53). – С. 77-82.
13. Тихов С.В., Гориков О.Н., Антонов И.Н., Касаткин А.П., Королев Д.С., Белов А.И., Тетельбаум Д.И. Изменение иммитанса при электроформовке и резистивном переключении в мемристивных структурах “металл–диэлектрик–металл” на основе SiO_x // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, № 5. – С. 107-111.
14. Prezioso M., Merrikkh-Bayat F., Hoskins B.D., Adam G.C., Likharev K.K., Strukov, D.B. Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors // Nature. – 2015. – Vol. 521, No. 7550. – P. 61-64.
15. Белов А.И., Михайлов А.Н., Королев Д.С., Сергеев В.А., Антонов И.Н., Гориков О.Н., Тетельбаум Д.И. Резистивное переключение в мемристивных структурах Au/SiO_x/TiN/Ti с различными геометрическими параметрами и стехиометрией диэлектрической пленки // Письма в Журнал технической физики. – 2016. – Т. 42, № 10. – С. 17-24.
16. Смирнов В.А., Томинов Р.В., Авилов В.И., Агеев О.А. Исследование forming-free резистивного переключения нанокристаллических пленок оксида цинка для создания нейроморфных систем // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S4. – С. 581-582.
17. Тихов С.В., Шенгуров В.Г., Денисов С.А., Антонов И.Н., Круглов А.В., Белов А.И., Михайлов А.Н. Резистивное переключение в структурах металл–оксид–полупроводник с nanoостровками GeSi на подложке кремния // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90, № 10. – С. 1741-1749.
18. Gale E. TiO₂-based memristors and ReRAM: materials, mechanisms and models (a review) // Semiconductor Science and Technology. – 2014. – No. 10 (29). – P. 104004.
19. Тихов С.В., Гориков О.Н., Белов А.И., Антонов И.Н., Морозов А.И., Коряжкина М.Н., Михайлов А.Н. Механизмы токопереноса и резистивного переключения в конденсаторах со слоями стабилизированного иттрием диоксида гафния // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89, № 6. – С. 927-934.
20. Yoon J.H., Wang Z., Kim K.M., Wu H., Ravichandran V., Xia Q., Yang J.J. An artificial nociceptor based on a diffusive memristor // Nature communications. – 2018. – Vol. 9, No. 1. – P. 417.
21. Филатов Д.О., Антонов Д.А., Антонов И.Н., Белов А.И., Баранова В.Н., Шенина М.Е., Гориков О.Н. Резистивное переключение мемристоров на основе стабилизированного диоксида циркония сложными сигналами // Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62, № 4. – P. 556-561.
22. Tominov R.V., Vakulov Z.E., Polupanov N.V., Saenko A.V., Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A. Nanoscale-Resistive Switching in Forming-Free Zinc Oxide Memristive Structures // Nanomaterials. – 2022. – No. 3 (12). – P. 455.

REFERENCES

1. Das S., Dey A., Pal A., & Roy N. Role of artificial intelligence and machine learning in nanosafety, *Small*, 2020, Vol. 16, No. 36, pp. 2001883.
2. Guo K., Yang Z., Yu C.H., Buehler M.J. Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials, *Materials Horizons*, 2021, Vol. 8, No. 4, pp. 1153-1172.
3. Demin V.A., Emelyanov A.V., Lapkin D.A., Erokhin V.V., Kashkarov P.K., Kovalchuk M.V. Neuromorphic elements and systems as the basis for the physical implementation of artificial intelligence technologies, *Crystallography Reports*, 2016, No. 1 (61), pp. 992-1001.
4. Tominov R.V., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Shikhovtsov I.A., Smirnov V.A. Issledovanie vliyaniya materiala kontaktov i tolshchiny plenok na rezistivnoe pereklyuchenie v ne trebuyushchikh formovki nanokristallicheskih plenках ZnO dlya neyromorfnykh ustroystv na osnove memristornykh struktur [Study of the influence of contact material and film thickness on resistive switching in mold-free nanocrystalline ZnO films for neuromorphic devices based on memristor structures], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2022, Vol. 15, No. S8-2, pp. 509-515.

5. *Shchanikov S.A., Bordanov I.A., Zuev A.D., Danilin S.N., Korolev D.S., Belov A.I., Mikhaylov A.N.* Primenenie sistemnogo podkhoda pri sozdanih iskusstvennykh neyronnykh setey na baze memristorov [Application of a systems approach to creating artificial neural networks based on memristors], *Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye* [Neurocomputers and Their Application], 2020, pp. 18-23.
6. *Rozhnova M.A., Pankratova E.V., Stasenko S.V., Kazantsev V.B.* Bifurcation analysis of multistability and oscillation emergence in a model of brain extracellular matrix, *Chaos, Solitons & Fractals*, 2021, No. 1 (151), pp. 111253.
7. *Tominov R., Avilov V., Vakulov Z., Khakhulin D., Ageev O., Valov I., Smirnov V.* Forming-Free Resistive Switching of Electrochemical Titanium Oxide Localized Nanostructures: Anodization, Chemical Composition, Nanoscale Size Effects, and Memristive Storage, *Advanced Electronic Materials*, 2022, No. 8 (8), pp. 2200215.
8. *Tikhov S.V., Gorshkov O.N., Antonov I.N., Tetel'baum D.I., Mikhaylov A.N., Belov A.I., Morozov A.I.* Osobennosti povedeniya MDP memristorov s nanosloem Si₃N₄, izgotovlennykh na osnove provodyashchey podlozhki Si [Features of the behavior of MIS memristors with a Si₃N₄ nanolayer, manufactured on the basis of a conductive Si substrate], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors], 2018, Vol. 52, No. 12, pp. 1436-1442.
9. *Tominov R.V., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Smirnov V.A., Ageev O.A.* Issledovanie rezistivnogo pereklyucheniya ne trebuyushchikh formovki nanokristallicheskikh plenok oksida tsinka dlya neyromorfnykh sistem iskusstvennogo intellekta [Study of resistive switching of mold-free nanocrystalline zinc oxide films for neuromorphic artificial intelligence systems], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2020, Vol. 13, No. S5-3, pp. 733-739.
10. *Kruglov A.V., Serov D.A., Belov A.I., Koryazhkina M.N., Antonov I.N., Zubkov S.Yu., Gorshkov O.N.* Memristory dlya energonezavisimoy rezistivnoy pamyati na osnove dvukhsloynnogo dielektrika Al₂O₃/ZrO₂(Y) [Memristors for non-volatile resistive memory based on a two-layer dielectric Al₂O₃/ZrO₂(Y)], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2024, Vol. 94, No. 11, pp. 1833-1842.
11. *Tominov R.V., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Khakhulin D.A., Fedotov A.A., Zamburg E.G., Ageev O.A.* Synthesis and memristor effect of a forming-free ZnO nanocrystalline films, *Nanomaterials*, 2020, No. 5 (10), pp. 1007.
12. *Smirnov V.A., Tominov R.V., Avilov V.I., Alyab'eva N.I., Vakulov Z.E., Zamburg E.G., Ageev O.A.* Issledovanie memristornogo effekta v nanokristallicheskikh plenках ZnO [Study of the memristor effect in nanocrystalline ZnO films], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors], 2019, No. 1 (53), pp. 77-82.
13. *Tikhov S.V., Gorshkov O.N., Antonov I.N., Kasatkin A.P., Korolev D.S., Belov A.I., Tetel'baum D.I.* Izmeneniye immitansa pri elektroformovke i rezistivnom pereklyuchenii v memristivnykh strukturakh "metall-dielektrik-metal" na osnove SiO_x [Change in immittance during electroforming and resistive switching in memristive metal-insulator-metal structures based on SiO_x], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2016, Vol. 86, No. 5, pp. 107-111.
14. *Prezioso M., Merrih-Bayat F., Hoskins B.D., Adam G.C., Likharev K.K., Strukov, D.B.* Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors, *Nature*, 2015, Vol. 521, No. 7550, pp. 61-64.
15. *Belov A.I., Mikhaylov A.N., Korolev D.S., Sergeev V.A., Antonov I.N., Gorshkov O.N., Tetel'baum D.I.* Rezistivnoe pereklyucheniye v memristivnykh strukturakh Au/SiO_x/TiN/Ti s razlichnymi geometricheskimi parametrami i stekhiometriy dielektricheskoy plenki [Resistive switching in Au/SiO_x/TiN/Ti memristive structures with different geometric parameters and stoichiometry of the dielectric film], *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Letters to the Journal of Technical Physics], 2016, Vol. 42, No. 10, pp. 17-24.
16. *Smirnov V.A., Tominov R.V., Avilov V.I., Ageev O.A.* Issledovanie forming-free rezistivnogo pereklyucheniya nanokristallicheskikh plenok oksida tsinka dlya sozdaniya neyromorfnykh sistem [Study of forming-free resistive switching of nanocrystalline zinc oxide films for creating neuromorphic systems], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2020, Vol. 13, No. S4, pp. 581-582.
17. *Tikhov S.V., SHengurov V.G., Denisov S.A., Antonov I.N., Kruglov A.V., Belov A.I., Mikhaylov A.N.* Rezistivnoe pereklyucheniye v strukturakh metall-oksid-poluprovodnik s nanoostrovkami GeSi na podlozhke kremniya [Resistive switching in metal-oxide-semiconductor structures with GeSi nanoislands on a silicon substrate], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2020, Vol. 90, No. 10, pp. 1741-1749.
18. *Gale E.* TiO₂-based memristors and ReRAM: materials, mechanisms and models (a review), *Semiconductor Science and Technology*, 2014, No. 10 (29), pp. 104004.
19. *Tikhov S.V., Gorshkov O.N., Belov A.I., Antonov I.N., Morozov A.I., Koryazhkina M.N., Mikhaylov A.N.* Mekhanizmy tokoperenosa i rezistivnogo pereklyucheniya v kondensatorakh so sloyami stabilizirovannogo itriem dioksida gafniya [Mechanisms of current transport and resistive switching in capacitors with yttrium-stabilized hafnium dioxide layers], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2019, Vol. 89, No. 6, pp. 927-934.

20. Yoon J.H., Wang Z., Kim K.M., Wu H., Ravichandran V., Xia Q., Yang J.J. An artificial nociceptor based on a diffusive memristor, *Nature communications*, 2018, Vol. 9, No. 1, pp. 417.
21. Filatov D.O., Antonov D.A., Antonov I.N., Belov A.I., Baranova V.N., Shenina M.E., Gorshkov O.N. Rezistivnoe pereklyuchenie memristorov na osnove stabilizirovannogo dioksida tsirkoniya slozhnymi signalami [Resistive switching of memristors based on stabilized zirconium dioxide by complex signals], *Fizika tverdogo tela* [Solid State Physics], 2020, Vol. 62, No. 4, pp. 556-561.
22. Tominov R.V., Vakulov Z.E., Polupanov N.V., Saenko A.V., Avilov V.I., Ageev O.A., Smirnov V.A. Nanoscale-Resistive Switching in Forming-Free Zinc Oxide Memristive Structures, *Nanomaterials*, 2022, No. 3 (12), pp. 455.

Томинов Роман Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: tominov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.; с.н.с.

Вакулов Захар Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: zvakulov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.; с.н.с.

Варганов Вадим Ильич – Южный федеральный университет; e-mail: varganov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; аспирант.

Игнатьева Ирина Олеговна – Южный федеральный университет; e-mail: iignateva@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.

Смирнов Владимир Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371767; к.т.н.; в.н.с.

Tominov Roman Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: tominov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Vakulov Zakhar Evgenievich – Southern Federal University; e-mail: zvakulov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Varganov Vadim Ilyich – Southern Federal University; e-mail: varganov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; postgraduate student.

Ignatieva Irina Olegovna – Southern Federal University; e-mail: iignateva@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.

Smirnov Vladimir Aleksandrovich – Southern Federal University; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371767; cand. of eng. sc.; leading researcher.

УДК 621.376

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-207-220

А.С. Мамитов, К.Е. Румянцев

ФОРМИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МОДУЛЯЦИЕЙ КВАДРАТУРНЫМ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫМ РАДИОСИГНАЛОМ

Применение широкополосного оптического усиления, волнового мультиплексирования, компенсации дисперсии оптического излучения, дифференциальной фазовой манипуляции позволяет обеспечить передачу данных со скоростью до 40 Гбит/с. Перспектива дальнейшего увеличения скорости передачи данных до 100 Гбит/с связана с применением многоуровневого формата модуляции радиосигналов на нескольких поднесущих частотах, модуляции излучения одного оптического квантового генератора радиосигналами на нескольких поднесущих частотах, балансного гомодинного детектирования когерентного оптического излучения и цифровой обработки радиосигналов. Символьная передача посредством квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) обеспечивает высокую скорость передачи данных. Известны исследования, где обосновано применение алгоритма генерации когерентного оптического излучения с одной боковой полосой с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. За счёт аппаратных нестабильностей возможно возникновение амплитудных и фазовых погрешностей, которые приводят к разбалансу квадратур. Эти неточности вызывают дополнительные ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут значительно ухудшить помехоустойчивость приёма. Целью настоящего исследования является анализ процесса формирования однополосного оптиче-

ского излучения, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией с помощью двух параллельно включённых интерферометров Маха-Цендера. Отличительная особенность состоит в том, что математические соотношения позволяют в дальнейшем оценить влияние на качество приёма амплитудных и фазовых погрешностей формирования квадратурных колебаний (разбаланса квадратур).

Когерентное оптическое излучение; интерферометр Маха-Цендера; формирование однополосного оптического излучения; квадратурный фазоманипулированный радиосигнал; разбаланс квадратур.

A.S. Mamitov, K.E. Rumyantsev

GENERATION OF COHERENT OPTICAL RADIATION MODULATED BY A QUADRATURE PHASE-SHIFT KEYED RADIO SIGNAL

The use of broadband optical amplification, wave division multiplexing, dispersion compensation of optical radiation, and differential phase-shift keying enables data transmission at rates of up to 40 Gbit/s. Prospects for further increasing transmission rates to 100 Gbit/s are associated with the use of multilevel modulation formats for radio signals on multiple subcarrier frequencies, modulation of the radiation from a single optical quantum generator by radio signals on multiple subcarriers, balanced homodyne detection of coherent optical radiation, and digital signal processing. Symbol-based transmission via quadrature phase-shift keying (QPSK) provides high data rates. Prior studies have substantiated the use of a single-sideband coherent optical radiation generation algorithm with subcarrier QPSK modulation. Due to hardware instabilities, amplitude and phase errors may arise, leading to quadrature imbalance. These inaccuracies introduce additional errors during demodulation of the received signal, which can significantly degrade reception interference immunity. The aim of this study is to analyze the process of generating single-sideband optical radiation modulated by a QPSK radio signal on a subcarrier frequency using two parallel Mach-Zehnder interferometers. A distinguishing feature of the proposed approach is that the derived mathematical relationships make it possible to subsequently assess the impact of amplitude and phase errors in quadrature signal generation (quadrature imbalance) on reception quality.

Coherent optical radiation; Mach-Zehnder interferometer; single-sideband optical radiation generation; quadrature phase-shift keyed radio signal; quadrature imbalance.

Введение. Технология когерентной оптической связи позволяет создать систему передачи на большие расстояния с высокой пропускной способностью [1–4]. Применение широкополосного оптического усиления, волнового мультиплексирования (wavelength division multiplexing, WDM), компенсации дисперсии оптического излучения, дифференциальной фазовой манипуляции (Differential Phase Shift Keying, DPSK) позволяет увеличить скорость передачи данных до 40 Гбит/с [5]. Перспектива дальнейшего увеличения скорости передачи данных до 100 Гбит/с связана с применением многоуровневого формата модуляции и балансного гомодинного детектированием когерентного оптического излучения, с цифровой обработкой радиосигналов.

Для увеличения пропускной способности в когерентных оптических системах используется мультиплексирование [6], когда манипулированные разными потоками данных радиосигналы на нескольких поднесущих частотах модулируют излучение одного оптического квантового генератора (ОКГ). Одним из преимуществ мультиплексирования на поднесущих частотах (SCM – Subcarrier Multiplexing) является то, что устройства СВЧ для формирования и обработки радиосигналов более стабильны, чем их оптические аналоги [7–9].

Высокоскоростная связь с высокой пропускной способностью особенно важна для лазерных спутниковых систем [10]. В частности, применение квадратурной фазовой манипуляции (QPSK – quadrature phase-shift keying или 4-PSK) обеспечивает высокую скорость передачи данных простым, надёжным и экономичным способом. Передача нескольких бит, как символа, реализуется простыми синфазными и квадратурными форматами модуляции.

Исследования, результаты которых описаны в [11], обосновывают применение алгоритма генерации когерентного оптического излучения с одной боковой полосой с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK). Алгоритм реализуется на двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера (Mach-Zehnder, ИМЦ) на кристалле из ниобата лития в двухтактной конфигурации с постоянным напряжением смещения на всех плечах интерферометров с включением преобразования Гильберта радиосигнала. Последова-

тельность бит, генерируемая со скоростью 10 Гбит/с, преобразуется в последовательность символов с использованием фазовой манипуляции (PSK). Электрические импульсы подаются на электроды электрооптического модулятора по схеме интерферометра Маха–Цендера. Квадратурный модулятор с двумя параллельно включёнными интерферометрами Маха–Цендера работает в квадратурной рабочей точке как в синфазном, так и в квадратурном плечах. Оптическая волна излучается лазером непрерывного действия с длиной волны 1550 нм. Результаты моделирования показывают, что благодаря введения операции преобразования Гильберта для радиосигнала с поднесущей частотой 10 ГГц обеспечивается скорость передачи данных 10 Гбит/с.

В [12, 13] проанализирован канал спутниковой связи в условиях атмосферной турбулентности, где использовано однополосное оптическое излучение с модуляцией радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией. Разработана модель канала связи, учитывающая как атмосферную турбулентность, так и основные параметры передающей станции и приёмной антенны. Численные результаты, представленные в исследовании лазерной спутниковой связи, основаны на атмосферной высотной модели структурной характеристики флуктуаций показателя преломления Хафнагеля-Валли. Проведённый анализ позволяет оценить влияние на принимаемую мощность оптического излучения атмосферной турбулентности, ошибки наведения и диаметра приёмной апертуры телескопов при передаче лазерного сигнала между наземной станцией и спутником для системы лазерной связи.

В то же время за счёт аппаратурных нестабильностей возможно возникновение амплитудных и фазовых погрешностей, которые приводят к разбалансу квадратур. Эти неточности вызывают дополнительные ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут значительно ухудшить помехоустойчивость приёма [14, 15]. Полученные ранее соотношения не позволяют оценить влияние на качество приёма амплитудных и фазовых погрешностей формирования квадратурных колебаний (разбаланса квадратур). Актуальным направлением следует считать получение зависимостей вероятности битовой ошибки (BER) не только от отношения сигнал/шум (ОСШ), но и от уровня амплитудного разбаланса и фазовой погрешности формирования квадратур.

Используемая ранее модель формирования однополосного оптического излучения, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией, не позволяет сформулировать требования к стабильности оптического квантового генератора и электронного генератора поднесущей частоты.

Целью настоящего исследования является получение аналитических выражений для описания процесса формирования и спектрального анализа радиосигналов и оптического излучения на выходах функциональных устройств передающей станции с учётом амплитудных и фазовых погрешностей формирования квадратурных колебаний

Структура передающей станции когерентной оптической системы. Применение технологии когерентной оптической связи позволяет передавать информацию на большие расстояния с высокой пропускной способностью. Квадратурная фазовая манипуляция (QPSK) обеспечивает помехоустойчивость к внешним воздействиям при высокой скорости передачи данных [16–19]. Преимущества каждого из этих подходов предполагаются реализуются в предлагаемой когерентной оптической системе.

На рис. 1 приведена структурная схема передающей станции когерентной системы с амплитудной модуляцией оптического излучения радиосигналом. Для распределения ключа используется квадратурная фазовая манипуляция радиосигнала на поднесущей частоте.

Формирование синфазного и квадратурного гармонических колебаний. При квадратурной фазовой манипуляции радиосигнала необходимы два колебания $u_{pч,I}(t)$ и $u_{pч,Q}(t)$ с одинаковой поднесущей радиочастотой $f_{pч}$, но сдвинутые по фазе на 90° . В схеме на рис. 1 это достигается использованием блока формирования квадратурных гармонических колебаний поднесущей радиочастоты $f_{pч}$ [14, 15]. На его первом выходе генерируется синфазное (I) гармоническое колебание

$$u_{pч,I} = U_{pч} \cdot \cos(\theta_{pч}) \quad (1)$$

с амплитудой $U_{pч}$, поднесущей частотой $f_{pч}$, начальной фазой $\varphi_{pч}$ и мгновенной фазой $\theta_{pч} = 2\pi f_{pч}t + \varphi_{pч}$.

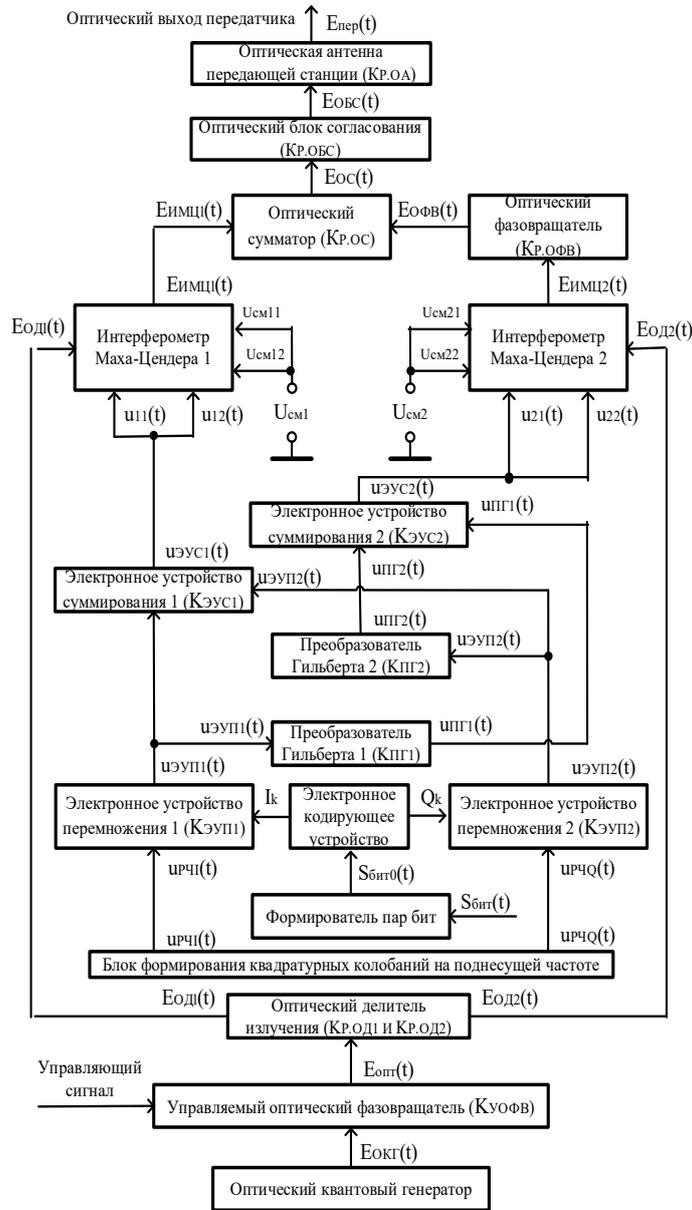


Рис. 1. Структурная схема передающей станции когерентной оптической системы передачи однополосного оптического излучения, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией

На втором выходе блока формирования квадратурных (Q) гармонических колебаний формируется квадратурное синусоидальное колебание

$$u_{рч,Q}(t) = -\delta_{Uрч} \cdot U_{рч} \cdot \sin(\theta_{рч} + \delta_{\thetaрч}). \quad (2)$$

Наличие амплитудного и фазового разбалансов квадратур опорных колебаний учтены введением коэффициента амплитудного разбаланса $\delta_{Uрч}$ и дополнительного фазового сдвига $\delta_{\thetaрч}$ в формуле (2). При отсутствии разбалансов квадратур $\delta_{Uрч} = 1$ и $\delta_{\thetaрч} = 0$.

Кодирование синфазной и квадратурной составляющих. Применяемая квадратурная фазовая манипуляция QPSK кодирует два бита передаваемой информации одним символом. Причём длительность двоичного бита τ_b в 2 раза меньше длительности символа τ_s , т.е. $\tau_s = 2 \cdot \tau_{бит}$. При этом символьная скорость в два раза ниже скорости передачи информации.

Из исходного потока данных (бит) $S_{бит}(t)$ выделяется поток пар бит $S_{бит0}(t)$. Сформированный поток пар бит $S_{бит0}(t)$ преобразуется в электронном кодирующем устройстве в поток символов для умножения (модуляции) синфазного гармонического колебания на коэффициент умножения I_j , а квадратурного колебания – на коэффициент Q_j в соответствии с принципами квадратурной фазовой манипуляции QPSK. Причём сигнал I_j кодирует первый, а сигнал Q_j – второй бит пары.

Из табл. 1 следует, что формирование на передающей станции j -го бита в ключевой последовательности во временном интервале $t \in [t_j; t_j + \tau_{бит}]$ предусматривает генерацию в момент $t = t_j$ двух чисел I_{kj} и Q_{kj} для синфазных и квадратурных составляющих радиосигнала, значения которых могут принимать только два значения «-1» или «+1».

Таблица 1

Соответствие между символами QPSK, значениями коэффициентов умножения I_i синфазного и Q_i квадратурного колебаний

Символ QPSK k	Коэффициент умножения	
	синфазного колебания I_k	квадратурного колебания Q_k
11	1	1
01	-1	1
00	-1	-1
10	1	-1

Набор коэффициентов умножения амплитуд I_{kj} и Q_{kj} радиосигналов для каждого j -го бита задаётся электронным устройством кодирования. Поскольку последующий анализ проводится применительно к формированию одного j -го бита, то, для упрощения записи, полагается $I_{kj} = I_k$ и $Q_{kj} = Q_k$.

Формирование модулирующих напряжений для оптического фазового модулятора. На выходах первого и второго электронных устройств перемножения (ЭУП) с равными коэффициентами передачи напряжения $K_{ЭУП}$ будут действовать радиосигналы с одинаковыми амплитудами $K_{ЭУП}U_{рч}$ и мгновенными фазами $\theta_{рч}$:

$$\begin{aligned} u_{ЭУП1}(t) &= K_{ЭУП}I_k u_{рчI}(t) = K_{ЭУП}U_{рч}I_k \cos(\theta_{рч}); \\ u_{ЭУП2}(t) &= K_{ЭУП}Q_k u_{рчQ}(t) = -K_{ЭУП}\delta_{Урч}U_{рч}Q_k \sin(\theta_{рч} + \delta_{\theta_{рч}}). \end{aligned} \quad (3)$$

В отсутствие амплитудного разбаланса квадратур опорных колебаний ($\delta_{Урч} = 1$) амплитуды радиосигналов на выходе электронных устройств перемножения одинаковы и равны $K_{ЭУП}U_{рч}$.

На выходе первого аналогового электронного устройства суммирования (ЭУС) с коэффициентом передачи напряжения $K_{ЭУС1}$ формируется радиосигнал

$$u_{ЭУС1}(t) = K_{ЭУС1}[u_{ЭУП1}(t) + u_{ЭУП2}(t)]$$

для управления первым фазовым модулятором на оптическом интерферометре Маха-Цендера. Причём

$$u_{ЭУС1}(t) = K_{ЭУС1}K_{ЭУП}U_{рч}[I_k \cos(\theta_{рч}) - \delta_{Урч}Q_k \sin(\theta_{рч} + \delta_{\theta_{рч}})]. \quad (4)$$

Для формирования сигнала с однополосной модуляцией используется преобразование Гильберта. Аналитический выходной сигнал преобразователя Гильберта является обобщением комплексного представления узкополосного сигнала. Применение преобразования Гильберта и аналитического сигнала позволяют выполнять квадратурную модуляцию радиосигналов. Здесь в каждой текущей координате модулированных сигналов производится определение огибающей, мгновенной фазы и частоты радиосигналов.

Преобразователь Гильберта осуществляет поворот начальных фаз всех спектральных составляющих входного сигнала на один и тот же угол $-\pi/2$.

Используя кусочно-постоянную функцию Кронекера

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0; \\ 0, & x = 0; \\ -1, & x < 0, \end{cases}$$

функция $\cos(\theta_{pч})$ в (3) после преобразования Гильберта в первом преобразователе Гильберта (ПГ1) приобретает вид

$$\operatorname{sgn}(f_{pч}) \cdot \cos\left(\theta_{pч} - \frac{\pi}{2}\right) = \operatorname{sgn}(f_{pч}) \cdot \sin(\theta_{pч}).$$

Аналогично функция $\sin(\theta_{pч})$ после преобразования Гильберта во втором преобразователе (ПГ2) преобразуется в

$$\operatorname{sgn}(f_{pч}) \cdot \sin\left(\theta_{pч} + \delta_{\theta pч} - \frac{\pi}{2}\right) = -\operatorname{sgn}(f_{pч}) \cdot \cos(\theta_{pч} + \delta_{\theta pч}).$$

Следовательно, на выходах преобразователей Гильберта с коэффициентами передачи $K_{ПГ1}$ и $K_{ПГ2}$ формируются сигналы

$$\begin{aligned} u_{ПГ1}(t) &= K_{ПГ1} K_{ЭУП} U_{pч} I_k \sin(\theta_{pч}); \\ u_{ПГ2}(t) &= K_{ПГ2} K_{ЭУП} U_{pч} \delta_{U pч} Q_k \cos(\theta_{pч} + \delta_{\theta pч}). \end{aligned} \quad (5)$$

На выходе второго аналогового электронного устройства суммирования (ЭУС2) с коэффициентом передачи $K_{ЭУС2}$ формируется радиосигнал

$$u_{ЭУС2}(t) = K_{ЭУС2} [u_{ПГ2}(t) + u_{ПГ1}(t)]$$

для управления вторым фазовым модулятором на оптическом интерферометре Маха-Цендера.

С учётом (5) при равенстве коэффициентов передачи $K_{ПГ1} = K_{ПГ2} = K_{ПГ}$ преобразователей Гильберта имеем

$$u_{ЭУС2}(t) = K_{ЭУС2} K_{ПГ} K_{ЭУП} U_{pч} [I_k \sin(\theta_{pч}) + \delta_{U pч} Q_k \cos(\theta_{pч} + \delta_{\theta pч})]. \quad (6)$$

Радиосигнал (4) с выхода первого $u_{ЭВУ1}(t)$ и сигнал (6) с выхода второго $u_{ЭУС2}(t)$ аналоговых электронных устройств суммирования подаются на отдельные управляющие (верхние) электрические электроды соответственно первого и второго оптических фазовых модуляторов в составе интерферометра Маха-Цендера (рис. 2).

Формирование оптического излучения. На оптические входы интерферометров Маха-Цендера подаются непрерывные оптические излучения. Пусть оптический квантовый генератор (ОКГ) генерирует непрерывное немодулированное монохроматическое излучение с мощностью $P_{ОКГ}$, частотой $f_{опт}$, начальной фазой $\varphi_{опт}$ и мгновенной фазой $\theta_{опт} = 2\pi f_{опт} t + \varphi_{опт}$.

Мгновенное значение электромагнитного поля оптического колебания ОКГ с амплитудой $E_{mОКГ} = \sqrt{2 \cdot P_{ОКГ}}$ описывается формулой

$$E_{ОКГ}(t) = E_{mОКГ} \cdot \cos(\theta_{опт}) = \sqrt{2 \cdot P_{ОКГ}} \cdot \cos(\theta_{опт}). \quad (7)$$

В формуле (7) учтено, что мгновенное значение мощности ОКГ (лазера) определяется квадратом поля оптического излучения

$$P_{ОКГ}(t) = E_{ОКГ}^2(t) = 2 \cdot P_{ОКГ} \cdot \cos^2(\theta_{опт}).$$

Усреднение по периоду оптического колебания $P_{ОКГ}(t)$ даёт среднюю мощность оптического поля ОКГ $P_{опт}$.

Непрерывное монохроматическое излучение ОКГ (7) пропускается через управляемый оптический фазовращатель с коэффициентом передачи мощности $K_{р,уофв}$, вносящий приращение (сдвиг) мгновенной фазы $\theta_{опт}$ на $\Delta_{опт1}$. Введение в рассмотрение управляемого оптического фазовращателя, по мнению авторов статьи, полезно с позиций определения уровня шумов в приёмной станции на этапе настройки приёмо-передающей аппа-

ратуры. Кроме того, это позволит сформулировать требования к стабильности параметров оптического квантового генератора на передающей стороне и местного лазерного гетеродина при гомодинном приёме на приёмной стороне.

Непрерывное монохроматическое излучение с выхода управляемого оптического фазовращателя

$$E_{\text{опт}}(t) = \sqrt{2 \cdot K_{P, \text{УОФВ}} P_{\text{ОКГ}}} \cdot \cos(\theta_{\text{опт}} + \Delta_{\text{опт1}}) = E_{m\text{опт}} \cos(\theta_{\text{опт}} + \Delta_{\text{опт1}}) \quad (8)$$

посредством оптического делителя (ОД, разветвителя Y-типа) разделяется на две идентичные оптические волны $E_{\text{ОД1}}(t)$ и $E_{\text{ОД2}}(t)$ с равными амплитудами $E_{m\text{опт}}/2 = \sqrt{K_{P, \text{УОФВ}} \cdot P_{\text{ОКГ}}}/2$. Причём

$$E_{\text{ОД1}}(t) = E_{\text{ОД2}}(t) = E_{\text{ОД}}(t) = \frac{E_{\text{опт}}(t)}{2} = \sqrt{\frac{K_{P, \text{УОФВ}} P_{\text{ОКГ}}}{2}} \cos(\theta_{\text{опт}} + \Delta_{\text{опт1}}). \quad (9)$$

Фазовая модуляция оптического излучения в первом интерферометре Маха-Цендера. Применение интерферометра Маха Цендера [20] в качестве внешнего модулятора позволяет формировать различные форматы модуляции в высокоскоростных оптических системах передачи.

Электрооптический модулятор на основе интерферометра Маха-Цендера гарантирует максимальный электрооптический эффект. Внешняя модуляция, в отличие от прямой, позволяет модулировать оптическое излучение в более широкой полосе частот. Кроме того, на основе интерферометра Маха-Цендера возможна модуляция фазы оптической несущей, что увеличивает скорость передачи данных.

Интерферометр изготавливается из титана, который диффундируется в слой подложки из кристалла ниобата лития (LiNbO_3) Z-среза. Кристалл обладает сильным электрооптическим эффектом, так что если к нему приложить напряжение, то показатель преломления будет изменён. Изменение показателя преломления приводит к изменению оптической длины, и, таким образом, к дополнительному сдвигу фазы оптической несущей.

Использование интерферометра Маха-Цендера при одновременном фазовом сдвиге в его двух плечах позволяет существенно улучшить технические характеристики и обеспечить электромагнитную совместимость трактов передачи цифровых сигналов. В связи с этим целесообразно проанализировать процесс модуляции излучения лазера в одном интерферометре Маха-Цендера [21], структура которого представлена на рис. 2.

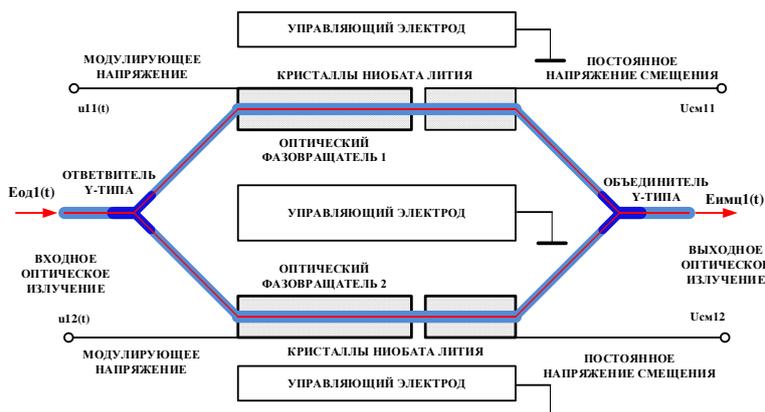


Рис. 2. Схема интерферометра Маха-Цендера с двумя управляющими электродами

Входное излучения интерферометра $E_{\text{ОД1}}(t)$ посредством оптического разветвителя Y-типа разделяется на две идентичные оптические волны с равными амплитудами $0,5\sqrt{K_{P, \text{УОФВ}} P_{\text{ОКГ}}}/2$.

Излучения в верхнем и нижнем плечах интерферометра Маха–Цендера с разветвителя Y-типа подаются на оптические фазовращатели из монокристаллического материала с линейным электрооптическим эффектом. На данном этапе полагаем, что постоянные напряжения смещения равны нулю ($U_{см11} = U_{см12} = 0$).

В верхнем плече интерферометра оптическое излучение распространяется через первый оптический фазовращатель ИМЦ (ОФВ1), где волна приобретает сдвиг фазы $\varphi_{ОФВ1}$ за счёт изменения показателя преломления кристалла под действием приложенного управляющего электрического напряжения u_{11} .

С учётом (9) оптическое излучение на выходе идеального первого оптического фазовращателя интерферометра, в котором отсутствуют потери, описывается формулой

$$E_{ОФВ1}(t) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{K_{р.уОФВ} P_{ОКГ}}{2}} \cdot \cos(\theta_{опт} + \Delta_{опт1} + \varphi_{ОФВ1}). \quad (10)$$

Аналогично, под действием управляющего электрического напряжения $u_{12}(t)$, приложенного ко второму оптическому фазовращателю ИМЦ (ОФВ2), проходящее через него излучение приобретает сдвиг фазы на $\varphi_{ОФВ2}(t)$. При $U_{см12} = 0$ излучение на выходе второго оптического фазовращателя описывается формулой

$$E_{ОФВ2}(t) = \sqrt{\frac{K_{р.уОФВ} P_{ОКГ}}{8}} \cdot \cos(\theta_{опт} + \Delta_{опт1} + \varphi_{ОФВ2}). \quad (11)$$

Модулированные по фазе оптические излучения с выходов оптических фазовращателей интерферируют в оптическом сумматоре (ОС), роль которого может выполнять объединитель Y-типа (см. рисунок 2). На выходе объединитель Y-типа, который является выходом интерферометра Маха-Цендера, формируется оптическое излучение

$$E_{ИМЦ1}(t) = E_{ОФВ1}(t) + E_{ОФВ2}(t).$$

С учётом (10) и (11) находим

$$E_{ИМЦ1}(t) = \sqrt{\frac{K_{р.уОФВ} P_{ОКГ}}{8}} \cdot [\cos(\theta_{опт} + \Delta_{опт1} + \varphi_{ОФВ1}) + \cos(\theta_{опт} + \Delta_{опт1} + \varphi_{ОФВ2})]$$

или

$$E_{ИМЦ1}(t) = \sqrt{\frac{K_{р.уОФВ} P_{ОКГ}}{8}} \cdot \cos\left(\theta_{опт} + \Delta_{опт1} + \frac{\varphi_{ОФВ1} + \varphi_{ОФВ2}}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{ОФВ1} - \varphi_{ОФВ2}}{2}\right). \quad (12)$$

Из (12) видно, что в режиме, когда в обоих плечах интерферометра задаются одинаковые фазовые сдвиги $\varphi_{ОФВ1} = \varphi_{ОФВ2} = \varphi_{ОФВ}$, реализуется требуемая фазовая модуляция оптического излучения

$$E_{ИМЦ1}(t) = \sqrt{\frac{K_{р.уОФВ} P_{ОКГ}}{8}} \cdot \cos(\theta_{опт} + \Delta_{опт1} + \varphi_{ОФВ}).$$

Фазовая модуляция оптического излучения в первом интерферометре Маха-Цендера в интегральном исполнении. Поскольку оптическое излучение с фазовой модуляцией более устойчиво к воздействию внешних помех, то остановимся на анализе типовой схемы фазового электрооптического модулятора Маха-Цендера в интегральном исполнении на рис. 2 [12]. В качестве материала для его создания используется ниобат лития (LiNbO_3). На поверхности этого материала создают необходимую волоконно-оптическую конфигурацию. Непрерывное излучение лазера посредством Y-разветвителя направляется по двум каналам (плечам интерферометра). На световоды напыляются управляющие электроды.

Выбор рабочей точки модулятора достигается с помощью постоянных напряжений смещения $U_{см11}$ и $U_{см12}$, которые вносят дополнительные контролируемые сдвиги фаз между оптическими волнами в плечах интерферометра. Для обеспечения смещения излучений обычно используется отдельная система электродов.



Рис. 3. Передаточная функция мощности электрооптического модулятора на интерферометре Маха-Цендера

В качестве рабочей точки фазового модулятора на интерферометре Маха-Цендера выбирается одна из трёх квадратурных точек передаточной функции мощности модулятора, обеспечивающая контролируемый сдвиг фаз на $-\pi/2$ (точка 1), $+\pi/2$ (точка 2) или $+3\pi/2$ (точка 3 на рис. 3). Это обеспечивает работу электрооптического фазового модулятора на линейном участке передаточной функции мощности, представляющей зависимость мощности излучения на выходе идеального, симметричного модулятора от разности фаз волн в плечах интерферометра [22].

На отдельные верхние и нижние управляющие электроды подаются сигнальные напряжения $u_{11}(t)$ и $u_{12}(t)$ и напряжения смещения $U_{см11}$ и $U_{см12}$, что позволяет управлять полями в плечах интерферометра независимо друг от друга. Следовательно, на верхние и нижние электроды первого интерферометра Маха-Цендера подаются управляющие напряжения

$$\begin{aligned} u_{ИМЦ11}(t) &= u_{11}(t) + U_{см11}; \\ u_{ИМЦ12}(t) &= u_{12}(t) + U_{см12}. \end{aligned} \quad (13)$$

Пусть на вход анализируемого первого интерферометра Маха-Цендера подаётся непрерывное оптическое излучение (9) с первого выхода оптического делителя $E_{ОД1}(t)$. На выходе интерферометра сдвинутые по фазе оптические волны суммируются в процессе интерференции [23]. Выходная оптическая волна интерферометра с коэффициентом передачи мощности $K_{р.ИМЦ1}$ описывается формулой

$$E_{ИМЦ1}(t) = \sqrt{K_{р.ИМЦ1}} \cdot \frac{E_{ОД1}(t)}{2} \cdot \rightarrow\leftarrow \cdot \left\{ \exp \left[j\pi \frac{u_{ИМЦ11}(t)}{U_{\pi}} \right] + \exp \left[j\pi \frac{u_{ИМЦ12}(t)}{U_{\pi}} \right] \right\}, \quad (14)$$

где U_{π} – полуволновое напряжение, необходимое для сдвига фазы оптического колебания на π .

Деление на 2 возникает из-за того, что входное оптическое излучение интерферометра (амплитуда) делится поровну между двумя его плечами.

При $U_{см11} = U_{см12} = U_{см1}$ и $u_{11}(t) = u_{12}(t) = u_{ЭУС1}(t)$ согласно (4), (13) и (14) находим

$$E_{ИМЦ1}(t) = \sqrt{K_{р.ИМЦ1}} \cdot E_{ОД1}(t) \cdot \exp \left[j\pi \frac{u_{ЭУС1}(t)}{U_{\pi}} \right] \cdot \exp \left[j\pi \frac{U_{см1}}{U_{\pi}} \right]. \quad (15)$$

Видно, что при подаче напряжений одинаковой полярности на электроды кристалла интерферометр выполняет роль оптического фазового модулятора. Причём при $U_{см1} = -U_{\pi}/2$ находим, что $\exp[j\pi U_{см1}/U_{\pi}] = \exp[-j\pi/2] = -j$. Следовательно, обеспечивая контролируемый сдвиг фаз на $-\pi/2$, гарантируется работа электрооптического модулятора на линейном участке передаточной функции мощности (точка 1 на рис. 3).

С учётом (4) и $U_{см1} = -U_{\pi}/2$ преобразуем (15) к виду

$$E_{имц1}(t) = -j \cdot \sqrt{K_{р.имц1}} \cdot E_{од1}(t) \cdot \exp \left[j\pi \frac{K_{эус1} K_{эуп} U_{рч} [I_k \cos(\theta_{рч}) - \delta_{урч} Q_k \sin(\theta_{рч} + \delta_{\theta_{рч}})]}{U_{\pi}} \right] \quad (16)$$

На выходе первого интерферометра формируется созвездие сигналов бинарной фазовой манипуляции BPSK (рис. 4,а).

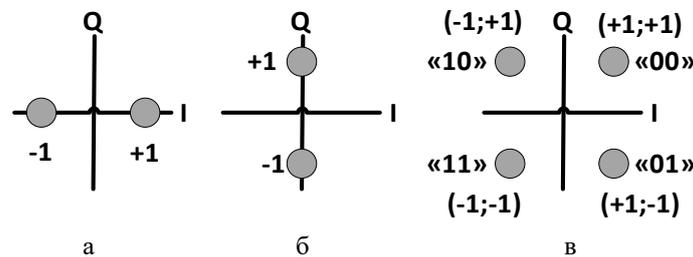


Рис. 4. Сигнальные созвездия фаз на выходах первого и второго интерферометров (а), фазовращателя (б) и оптического сумматора (в)

Фазовая модуляция оптического излучения во втором интерферометре Маха-Цендера. Второй интерферометр Маха-Цендера имеет пары отдельных верхних и нижних управляющих электродов, на которые подаются напряжения с выхода второго электронного устройства суммирования (см. рисунок 1). С учётом (6)

$$u_{21}(t) = u_{22}(t) = u_{эус2}(t) = K_{эус2} K_{пг} K_{эуп} U_{рч} [I_k \sin(\theta_{рч}) + \delta_{урч} Q_k \cos(\theta_{рч} + \delta_{\theta_{рч}})].$$

Выбор рабочей точки электрооптического модулятора достигается посредством приложения к электродам напряжений смещения

$$U_{см21} = U_{см22} = -U_{\pi}/2,$$

что обеспечивает заданный сдвиг фаз на $-\pi/2$ между оптическими волнами в плечах интерферометра, гарантируя работу модулятора на линейном участке передаточной функции мощности (точка 1 на рисунке 3).

На выходе второго интерферометра с коэффициентом передачи мощности $K_{р.имц2}$ сдвинутые по фазе оптические волны суммируются в процессе интерференции, формируя выходную оптическую волну интерферометра

$$E_{имц2}(t) = -j \cdot \sqrt{K_{р.имц2}} \cdot E_{од2}(t) \cdot \exp \left[j\pi \frac{K_{эус2} K_{пг} K_{эуп} U_{рч} [I_k \sin(\theta_{рч}) + \delta_{урч} Q_k \cos(\theta_{рч} + \delta_{\theta_{рч}})]}{U_{\pi}} \right] \quad (17)$$

Из (17) видно, что на выходе второго (нижнего) интерферометра также формируется созвездие сигналов бинарной фазовой манипуляции BPSK (рисунок 4, а).

Объединение оптических излучений с выходов интерферометров. К выходу второго интерферометра Маха-Цендера подключается оптический фазовращатель на $\pi/2$ с коэффициентом передачи мощности $K_{р.офв}$. С учётом (17) на выходе оптического фазовращателя формируется волна

$$\leftarrow \exp \left[j\pi \frac{K_{\text{ЭУС2}} K_{\text{ПГ}} K_{\text{ЭУП}} U_{\text{РЧ}} [I_k \sin(\theta_{\text{РЧ}}) + \delta_{U_{\text{РЧ}}} Q_k \cos(\theta_{\text{РЧ}} + \delta_{\theta_{\text{РЧ}}})]}{U_{\pi}} \right] \cdot E_{\text{ОФВ}}(t) = \sqrt{K_{\text{Р.ИМЦ2}} K_{\text{Р.ОФВ}}} \cdot E_{\text{ОД2}}(t) \rightarrow \quad (18)$$

Сравнение формул (16) и (18) показывает, что благодаря сдвига по фазе на $+\pi/2$ в оптическом фазовращателе излучения, поступающие на входные порты оптического сумматора, будут повернуты относительно друг друга на $\pi/2$ (сравните рисунки 4а и 4б).

Оптическая волна на выходе оптического сумматора с коэффициентом передачи мощности $K_{\text{Р.ОС}}$ описывается формулой

$$E_{\text{ОС}}(t) = \sqrt{K_{\text{Р.ОС}}} \cdot [E_{\text{ИМЦ1}}(t) + E_{\text{ОФВ}}(t)].$$

На практике обеспечивается равенство коэффициентов передачи мощности $K_{\text{Р.ИМЦ1}} = K_{\text{Р.ИМЦ2}} = K_{\text{Р.ИМЦ}}$ в плечах интерферометров Маха-Цендера и коэффициентов передачи напряжения аналоговых электронных устройств суммирования $K_{\text{ЭУС1}} = K_{\text{ЭУС2}} = K_{\text{ЭУС}}$. Передача напряжения в электронных преобразователях Гильберта может быть обеспечена с коэффициентами $K_{\text{ПГ1}} = K_{\text{ПГ2}} = K_{\text{ПГ}} \approx 1$. Это позволяет для упрощения записи формул ввести в рассмотрение обозначения для коэффициента фазовой модуляции радиосигнала

$$\alpha_{\text{РЧ}} = \pi \cdot K_{\text{ЭУС}} \cdot K_{\text{ЭУП}} \cdot \frac{U_{\text{РЧ}}}{U_{\pi}} \quad (19)$$

и для параметров модуляции

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= I_k \alpha_{\text{РЧ}} \cos(\theta_{\text{РЧ}}) - \delta_{U_{\text{РЧ}}} Q_k \alpha_{\text{РЧ}} \sin(\theta_{\text{РЧ}} + \delta_{\theta_{\text{РЧ}}}), \\ \alpha_2 &= I_k \alpha_{\text{РЧ}} \sin(\theta_{\text{РЧ}}) + \delta_{U_{\text{РЧ}}} Q_k \alpha_{\text{РЧ}} \cos(\theta_{\text{РЧ}} + \delta_{\theta_{\text{РЧ}}}). \end{aligned} \quad (20)$$

На практике коэффициент передачи оптических фазовращателей близок к единице. Так, например, оптоволоконные вращатели фазы OM-FPS вносят потери мощности до 0,1 дБ на рабочих длинах волн 780, 1060, 1310 и 1550 нм. Это позволяет в дальнейшем принять $K_{\text{Р.ОФВ}} = 1$.

С учётом (9), (16), (18) – (20) находим

$$E_{\text{ОС}}(t) = E_{\text{МОС}} \cdot [-j \cdot \exp[j\alpha_1] + \exp[j\alpha_2]] \cdot \cos(\theta_{\text{ОПТ}} + \Delta_{\text{ОПТ1}}). \quad (21)$$

где амплитуды двух суммируемых оптических волн в оптическом сумматоре равны

$$E_{\text{МОС}} = \sqrt{\frac{K_{\text{Р.ОС}} K_{\text{Р.ИМЦ}} K_{\text{Р.УОФВ}}}{2}} P_{\text{ОКГ}}. \quad (22)$$

Из формулы (21) видно, что генерируется сигнал с манипуляцией QPSK, созвездие которого показано на рис. 4,в.

Формирование выходного оптического поля передающей станции. Оптическая волна с выхода оптического сумматора последовательно проходит через оптический блок согласования (ОБС), включающий оптическую направляющую среду, с коэффициентом передачи мощности $K_{\text{Р.ОБС}}$ и передающую оптическую антенну (ПОА) с коэффициентом передачи мощности $K_{\text{Р.ПОА}}$. Отметим, что оптический блок согласования помимо оптической направляющей среды с коэффициентом усиления мощности $K_{\text{Р.ОНС}}$, может включать оптический усилитель (ОУ) с коэффициентом усиления мощности $K_{\text{Р.ОУ}}$. В некоторых случаях вместо оптического усилителя может включаться оптический аттенюатор (ОА) с коэффициентом передачи мощности $K_{\text{Р.ОА}}$. Последнее возможно в случае передачи вместо потока данных ключевой последовательности символов, затрудняя злоумышленнику перехват информации.

С учётом (21) и (22) оптическая волна передающей станции описывается формулой

$$E_{\text{пер}}(t) = E_{\text{мпер}} \cdot [-j \cdot \exp[j\alpha_1] + \exp[j\alpha_2]] \cdot \cos(\theta_{\text{ОПТ}} + \Delta_{\text{ОПТ1}}), \quad (23)$$

где

$$E_{\text{тпер}} = \sqrt{\frac{K_{P,\text{ПОА}}K_{P,\text{ОБС}}K_{P,\text{ОС}}K_{P,\text{ИМЦ}}K_{P,\text{УОФВ}}}{2}} P_{\text{ОКГ}}. \quad (24)$$

Формулы (23) и (24) показывают, что структура оптического квадратурного модулятора на двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера с постоянными напряжениями смещения на всех плечах управляющих электродах, представленная на рис. 1, обеспечивает формирование оптического излучения с модуляцией фазоманипулированным радиосигналом на поднесущей частоте.

Выводы. Проанализирован процесс формирования однополосного оптического излучения, модулированного радиосигналом на поднесущей частоте с квадратурной фазовой манипуляцией с помощью двух параллельно включённых интерферометрах Маха-Цендера. Получены соотношения, описывающие оптическое излучение и радиосигналы на выходе всех функциональных устройств оптического передатчика. Отличительная особенность математических соотношений состоит в том, что в них учтены амплитудные и фазовые погрешности формирования квадратурных колебаний (разбаланс квадратур). Последнее позволит в дальнейшем оценить влияние разбаланса квадратур на качество приёма когерентного оптического излучения с модуляцией квадратурным фазоманипулированным радиосигналом на поднесущей частоте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аничкин А.Д., Оленев В.Л.* Применение лазерных систем связи для передачи данных в космическом пространстве // Системный анализ и логистика. – 2024. – № 3 (41). – С. 17-24. – DOI: 10.31799/2077-5687-2024-3-17-24.
2. *Ибрагимов Р.З., Фокин В.Г.* Проектирование современных оптических транспортных сетей связи. – СПб.: Лань, 2023. – 112 с. – ISBN 978-5-507-45199-9.
3. *Блаунштейн Н.Ш., Крук Е.А., Сергеев М.Б.* Оптическая связь: оптоволоконная, атмосферная: монография. – СПб.: ГУАП, 2016. – 286 с. – ISBN: 978-5-8088-1157-7.
4. *Kim Geuk-Nam, Park Sang-Young, Seong Sehyun, Lee Joohee, Choi Suyong, Kim Young-Eon, Ryu Han-Gyeol, Lee Sungmoon, Choi Jae-Young, Han Sang Kook.* The VISION – Concept of laser crosslink systems using nanosatellites in formation flying // Acta Astronautica. – 2023. – Vol. 211. – P. 877-897.
5. *Mahmood H.A.* 40 Gbps Laguerre-Gaussian and Hermite-Gaussian Optical Mode Division Multiplexing for Radio over Fiber System // Journal of Optical Communications. – 2021. – Vol. 42, No. 4. – P. 689-692. – DOI 10.1515/joc-2018-0161.
6. *Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C., Demarest K. and Richards D.* Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission // IEEE Journal of Lightwave Technology. – March, 2002. – Vol. 20, No. 3. – P. 417-427.
7. *Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C., Demarest K., and Richards D.* 10-Gb/s SCM fiber system using optical SSB modulation // IEEE Photonics Technology Letters. – August, 2001. – Vol. 13, No. 8. – P. 896-898.
8. *Mahmood H.A., Ahmed R.K.* Radio over fiber performance evaluation in optical communication system utilizing FBG under different DCF schemes for DPSK format // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2019. – Vol. 14, No. 4. – P. 1130-1137. – DOI 10.36478/jeasci.2019.1130.1137.
9. *Ahmed R.K., Mahmood H.A.* Performance analysis of PAM intensity modulation based on dispersion compensation fiber technique for optical transmission system // 2018 1st International Scientific Conference of Engineering Sciences-3rd Scientific Conference of Engineering Science (ISCES). – 2018. – P. 126-130. – DOI: 10.1109/ISCES.2018.8340540.
10. *Mahmood H.A., Rumyantsev R.K., Al-Karawi H.S.* Evolution of radio over free space optical communication utilizing subcarrier multiplexing / amplitude shift keying // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 5 (215). – С. 141-149. – DOI: 10.18522/2311-3103-2020-5-141-149.
11. *Махмуд Х.А.М., Румянцев К.Е.* Формирование однополосной квадратурной фазовой манипуляции радиосигналов на поднесущих частотах в когерентной оптической системе коммуникации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 5 (229). – С. 209-220. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-209-220. – Режим доступа: https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/article/view/838/1024.
12. *Махмуд Х.А.М., Румянцев К.Е., Аль-Бегат А.Х.Ш.* Анализ восходящего лазерного канала спутниковой коммуникации в условиях атмосферной турбулентности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 4 (234). – С. 174-191. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-174-191.
13. *Mahmood H.A., Rumyantsev K.Y.* Effect of FBG Compensated Dispersion on SCM/ASK Radio over Fiber System // 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). – 2019. – Art. No 8966032. – P. 1-5. – DOI 10.1109/CISP-BMEI48845.2019.8966032.

14. Куликов Г.В., Лелюх А.А. Влияние амплитудного и фазового разбаланса квадратур на помехоустойчивость когерентного приёма сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией // Российский технологический журнал. – 2021. – 9 (1). – С. 29-37. – <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-29-37>.
15. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приёма сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). – 2018. – 11.
16. Скляр Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Digital Communications: Fundamentals and Applications. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – 1104 с. – ISBN 0-13-084788-7.
17. Берлин А.Н. Коммутация в системах и сетях связи. – М.: Эко-Трендз, 2006. – 344 с. – ISBN 5-88405-073-9.
18. Прохис, Дж. Цифровая связь. Digital Communications / под ред. Д.Д. Киевского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с. – ISBN 5-256-01434-X.
19. Варгаузин В.А., Цикин И.А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013.
20. Древо Д.Р., Зюрюкин Ю.А., Ушаков Н.М. Модификации электрооптического модулятора Маха–Цендера для управления лазерным излучением повышенной мощности // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: Матер. V конф. молодых учёных. – Саратов, 2010. – С. 18-19.
21. Слепов Н.Н. Оптические волоконные конверторы и модуляторы // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2000. – № 6. – С. 6-10.
22. Вобликов Е.Д., Волынец А.Б., Журавлев А.А., Кичанов А.В., Пономарев Р.С., Шевцов Д.И. Интегрально-оптический модулятор на основе интерферометра Маха–Цендера с асимметричной топологией волноводов // Тр. МАИ. – 2011. – № 46.
23. Seimetz M. High-order modulation for optical fiber transmission. – Springer Science & Business Media, 2009. – 252 p.

REFERENCES

1. Anichkin A.D., Olenov V.L. Primenenie lazernykh sistem svyazi dlya peredachi dannykh v kosmicheskom prostranstve [Application of laser communication systems for data transmission in outer space], *Sistemnyy analiz i logistika* [System Analysis and Logistics], 2024, No. 3 (41), pp. 17-24. DOI: 10.31799/2077 5687-2024-3-17-24.
2. Ibragimov R.Z., Fokin V.G. Proektirovanie sovremennykh opticheskikh transportnykh setey svyazi [Design of modern optical transport communication networks]. Saint Petersburg: Lan', 2023, 112 p. ISBN 978-5-507-45199-9.
3. Blaunshteyn N.Sh., Kruk E.A., Sergeev M.B. Opticheskaya svyaz': optovolokonnaya, atmosfernaya: monografiya [Optical communication: fiber-optic and free-space systems: monograph]. Saint Petersburg: GUAP, 2016, 286 p. ISBN: 978-5-8088-1157-7.
4. Kim Geuk-Nam, Park Sang-Young, Seong Sehyun, Lee Joohee, Choi Suyong, Kim Young-Eon, Ryu Han-Gyeol, Lee Sungmoon, Choi Jae-Young, Han Sang Kook. The VISION – Concept of laser cross-link systems using nanosatellites in formation flying, *Acta Astronautica*, 2023, Vol. 211, pp. 877-897.
5. Mahmood H.A. 40 Gbps Laguerre-Gaussian and Hermite-Gaussian Optical Mode Division Multiplexing for Radio over Fiber System, *Journal of Optical Communications*, 2021, Vol. 42, No. 4, pp. 689-692. DOI 10.1515/joc-2018-0161.
6. Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C., Demarest K. and Richards D. Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, March, 2002, Vol. 20, No. 3, pp. 417-427.
7. Hui R., Zhu B., Huang R., Allen C., Demarest K., and Richards D. 10-Gb/s SCM fiber system using optical SSB modulation, *IEEE Photonics Technology Letters*, August, 2001, Vol. 13, No. 8, pp. 896-898.
8. Mahmood H.A., Ahmed R.K. Radio over fiber performance evaluation in optical communication system utilizing FBG under different DCF schemes for DPSK format, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, Vol. 14, No. 4, pp. 1130-1137. DOI 10.36478/jeasci.2019.1130.1137.
9. Ahmed R.K., Mahmood H.A. Performance analysis of PAM intensity modulation based on dispersion compensation fiber technique for optical transmission system, *2018 1st International Scientific Conference of Engineering Sciences-3rd Scientific Conference of Engineering Science (ISCES)*, 2018, pp. 126-130. DOI: 10.1109/ISCES.2018.8340540.
10. Mahmood H.A., Rumyantsev R.K., Al-Karawi H.S. Evolution of radio over free space optical communication utilizing subcarrier multiplexing / amplitude shift keying, *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5 (215), pp. 141-149. DOI: 10.18522/2311-3103-2020-5-141-149.

11. *Makhmud Kh.A.M., Rumyantsev K.E.* Formirovanie odnopolosnoy kvadrurnoy fazovoy manipulyatsii radiosignalov na podnesushchikh chastotakh v kogerentnoy opticheskoy sisteme kommunikatsii [Generation of single-sideband quadrature phase-shift keyed radio signals on subcarrier frequencies in a coherent optical communication system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 5 (229), pp. 209-220. DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-209-220. – Rezhim dostupa: https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/article/view/838/1024.
12. *Makhmud Kh.A.M., Rumyantsev K.E., Al'-Begat A.Kh.Sh.* Analiz voskhodyashchego lazernogo kanala sputnikovoy kommunikatsii v usloviyakh atmosfery turbulentsi [Analysis of the Uplink Laser Channel in Satellite Communication under Atmospheric Turbulence Conditions], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 4 (234), pp. 174-191. DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-174-191.
13. *Mahmood H.A., Rumyantsev K.Y.* Effect of FBG Compensated Dispersion on SCM/ASK Radio over Fiber System, *12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, 2019, Art. No 8966032, pp. 1-5. DOI 10.1109/CISP-BMEI48845.2019.8966032.
14. *Kulikov G.V., Lelyukh A.A.* Vliyaniye amplitudnogo i fazovogo razbalansa kvadratur na pomexhostoychivost' kogerentnogo priema signalov s kvadrurnoy amplitudnoy modulyatsiyey [Impact of amplitude and phase quadrature imbalance on the noise immunity of coherent reception of quadrature amplitude modulated signals], *Rossiyskiy tekhnologicheskyy zhurnal* [Russian Technological Journal], 2021, 9 (1), pp. 29-37. Available at: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-29-37>.
15. *Kulikov G.V., Nesterov A.V., Lelyukh A.A.* Pomexhostoychivost' priema signalov s kvadrurnoy amplitudnoy manipulyatsiyey v prisutstvii garmonicheskoy po mekhi [Noise Immunity of Quadrature Amplitude Modulated Signal Reception in the Presence of Harmonic Interference], *Zhurnal radioelektroniki (elektronnyy zhurnal)* [Journal of Radio Electronics (electronic journal)], 2018, 11.
16. *Sklyar Bernard.* TSifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye. Digital Communications: Fundamentals and Applications [Digital communications: fundamentals and applications]. 2nd ed. Moscow: Vil'yams, 2007, 1104 p. ISBN 0-13-084788-7.
17. *Berlin A.N.* Kommutatsiya v sistemakh i setyakh svyazi [Switching in communication systems and networks]. Moscow: Eko-Trendz, 2006, 344 p. ISBN 5-88405-073-9.
18. *Prokis, Dz.* Tsifrovaya svyaz'. Digital Communications [Digital communications], ed.by D.D. Kievskogo. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 800 p. ISBN 5-256-01434-X.
19. *Vargauzin V.A., Tsikin I.A.* Metody povysheniya energeticheskoy i spektral'noy effektivnosti tsifrovoy radiosvyazi [Methods for enhancing the energy and spectral efficiency of digital radio communication]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2013.
20. *Drevko D.R., Zyuryukin Yu.A., Ushakov N.M.* Modifikatsii elektroopticheskogo modulyatora Makha–Tsendera dlya upravleniya lazernym izlucheniym povyshennoy moshchnosti [Modifications of the mach–zehnder electro-optic modulator for high-power laser radiation control], *Nanoelektronika, nanofotonika i nelineynaya fizika: Mater. V konf. molodykh uchennykh* [Nanoelectronics, Nanophotonics and Nonlinear Physics: V Rising Scholars Conference Materials]. Saratov, 2010, pp. 18-19.
21. *Slepov N.N.* Opticheskie volokonnyye konvertory i modulyatory [Optical fiber converters and modulators], *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2000, No. 6, pp. 6-10.
22. *Voblikov E.D., Volyntsev A.B., Zhuravlev A.A., Kichanov A.V., Ponomarev R.S., Shevtsov D.I.* Integral'no-opticheskyy modulyator na osnove interferometra Makha–Tsendera s asimmetrichnoy topologiyey volnovodov [Integrated optical modulator based on a Mach–Zehnder interferometer with asymmetric waveguide topology], *Tr. MAI* [Trudy MAI], 2011, No. 46.
23. *Seimetz M.* High-order modulation for optical fiber transmission. Springer Science & Business Media, 2009, 252 p.

Мамитов Александр Сергеевич – 578 военное представительство Министерства обороны Российской Федерации; e-mail: zander11@inbox.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79286207139; начальник.

Румянцев Константин Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: rummyantsev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79281827209; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Mamitov Alexander Sergeevich – 578 military representation of the Ministry of Defense Russian Federation; e-mail: zander11@inbox.ru; Moscow, Russia; phone: +79286207139; head.

Rumyantsev Konstantin Yevgenievich – Southern Federal University; e-mail: rummyantsev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281827209; the Department of Information Security of Telecommunication Systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Д.И. Бакшун, И.И. Турулин

ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕКУРСИВНОГО ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ В ВИДЕ СУММЫ КВАЗИГАРМОНИК УСЕЧЕННОГО РЯДА ФУРЬЕ

Задача сокращения количества арифметических операций в алгоритмах цифровой фильтрации является актуальной, поскольку это напрямую влияет на энергопотребление, быстродействие и аппаратные затраты. В условиях жестких требований к энергопотреблению мобильных и встраиваемых устройств сокращение операций умножения и сложения становится важным фактором проектирования. В статье рассмотрена методика реализации рекурсивного фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ) в виде усеченной функции sinc, сглаженной окном (весовой функцией), которая представляет собой сумму квазигармонических функций. Квазигармонические функции с разными частотами представляют собой полиномы степени r . За основу взят полином второй степени и предложен численный метод повышения степени полинома для улучшения точности аппроксимации. Анализ точности аппроксимации показал, что при использовании полиномов 4-ой и 6-ой степени достигается погрешность аппроксимации менее 1%. Коэффициенты нерекурсивной части фильтра вычисляются через нахождение обратных конечных разностей исходной КИХ. Коэффициентами являются целые числа, значения которых зависят от числа отсчетов (длины) полупериода квазисинусоидальной функции, что упрощает реализацию подобного РКИХ-фильтра на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Результаты численного анализа конечных разностей для каждой квазисинусоиды показали, что при использовании квадратичной аппроксимации требуется всего 16 отсчетов, однако при этом будет относительно высокий уровень боковых лепестков (-30 дБ). Переход к аппроксимации 4-го порядка увеличивает количество ненулевых коэффициентов до 20-ти и приводит к существенному (на 13 дБ) уменьшению уровня частотной характеристики в полосе заграждения, который достигает -43 дБ.

Рекурсивный; КИХ; ПЛИС; фильтр; окно Хэмминга; конечная импульсная характеристика; аппроксимация; sinc.

D.I. Bakshun, I.I. Turulin

FORMATION OF THE IMPULSE RESPONSE OF A RECURSIVE LOW-PASS FILTER WITH FINITE IMPULSE RESPONSE AS A SUM OF QUASI-HARMONICS OF A TRUNCATED FOURIER SERIES

The problem of reducing the number of arithmetic operations in digital filtering algorithms is highly relevant, as it directly impacts power consumption, processing speed, and hardware costs. Under strict power efficiency requirements for mobile and embedded systems, minimizing multiplication and addition operations becomes a critical design factor. This paper presents a method for implementing a recursive filter with a finite impulse response (FIR) based on a truncated sinc function smoothed by a window (weighting function), represented as a sum of quasi-harmonic functions. These quasi-harmonic functions with different frequencies are polynomials of degree r . The study adopts a second-degree polynomial as a baseline and proposes a numerical method for increasing the polynomial order to improve the accuracy of the approximation. Accuracy analysis demonstrates that using 4th- and 6th-order polynomials achieves an approximation error of less than 1%. The coefficients of the non-recursive part of the filter are computed via inverse finite differences of the original FIR impulse response. These coefficients are integers whose values depend on the number of samples (length) of the half-period of the quasi-sinusoidal function, simplifying the implementation of such a recursive FIR (RFIR) filter on a field-programmable gate array (FPGA). Numerical analysis of finite differences for each quasi-sinusoid revealed that quadratic approximation requires only 16 samples but results in relatively high side-lobe levels (-30 dB). Switching to 4th-order approximation increases the number of non-zero coefficients to 20 and significantly reduces (by 13 dB) the stopband magnitude of the frequency response, reaching -43 dB.

Recursive; FIR; FPGA; filter; Hamming window; finite impulse response; approximation; sinc.

Введение. Сокращение числа арифметических операций (сложение, умножение) в цифровых фильтрах является актуальной задачей, так как оно напрямую влияет на энергопотребление, быстродействие и аппаратные затраты. В реальных системах, особенно в мобильных и встраиваемых устройствах, ограниченные ресурсы требуют снижения вычислительной сложности. Уменьшение количества умножений снижает нагрузку на процессор, уменьшает площадь кристалла при аппаратной реализации и повышает энергоэффективность.

Сокращение вычислительных затрат достигается за счёт применения рекурсивных фильтров, характеризующихся малым числом ненулевых коэффициентов при сохранении заданной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Наибольшее распространение получили структуры с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ), однако существуют и рекурсивные фильтры с конечной импульсной характеристикой (РКИХ), использующие целочисленные или фиксированно-точечные коэффициенты. Ключевое преимущество РКИХ-фильтров с симметричной импульсной характеристикой (ИХ) заключается в гарантированно линейной фазочастотной характеристике (ФЧХ), что принципиально отличает их от классических рекурсивных БИХ-структур.

В статье рассматривается методика реализации РКИХ-фильтра нижних частот с ИХ, представляющей сумму гармоник, аппроксимированных степенным полиномом, что позволяет значительно сократить вычислительные затраты при выполнении фильтрации.

Проблема реализации ИХ в виде функции sinc. Импульсная характеристика КИХ-фильтра нижних частот формируется на основе функции sinc, которая в идеальном случае является бесконечной и соответствует прямоугольной амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) [1–3]. Однако практическая реализация требует её усечения до конечного числа отсчётов с применением весовых функций (окон). Это приводит к появлению переходной зоны и пульсаций в АЧХ (эффект Гиббса), при этом симметричное усечение sinc обеспечивает линейность ФЧХ фильтра.

В работах [4–9] подробно рассмотрены РКИХ-фильтры с ИХ в виде гармонических функций. Гармонические функции аппроксимированы степенными полиномом. Вычислительные затраты таких фильтров не зависят от длительности ИХ. Если представить усечённую sinc, сглаженную весовым окном, как сумму гармонических функций, аппроксимированных степенным полиномом, то можно значительно сократить вычислительные затраты за счёт применения РКИХ-структуры по сравнению с классической КИХ-структурой с теми же АЧХ и ФЧХ.

В работах [10–12] рассмотрены методы аппроксимации усечённых функций sinc используя тригонометрические сплайны. Результатом является возможность представления sinc на определённом временном интервале через ряд Фурье. Тогда требуется представить sinc рядом Фурье, гармонические функции которого, аппроксимированы степенным полиномом.

Формирование непрерывной усечённой функции sinc. Прежде чем сформировать дискретную ИХ фильтра в виде sinc, аппроксимированную степенным полиномом, для простоты предварительно рассмотрим ее непрерывную форму, аппроксимированную рядом Фурье. Для удобства дальнейшего перехода от непрерывных функций к дискретным, здесь и далее все функции будут рассматриваться на интервале $0 \leq x \leq \pi$, при этом центр функции sinc сдвинут вправо по времени (задержан) на $\pi/2$. Результатом разложения в ряд Фурье функции sinc является сумма нечетных гармоник

$$\text{sinc}(x) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m \sin(2m + 1)x, \quad (1)$$

где M – число гармоник.

На рис. 1 изображен график функции $\text{sinc}(x)$ при различном числе гармоник M .

Полученный результат является ограниченной функцией sinc (т.е. умноженной на весовую функцию прямоугольной формы), что приводит к эффекту Гиббса – возникновению боковых лепестков спектра. Для уменьшения уровня боковых лепестков необходимо применить весовую функцию, плавно спадающую к краям. Одними из простых часто применяемых сглаживающих весовых функций для формирования ИХ при разработке фильтров являются окна Ханна и Хемминга.

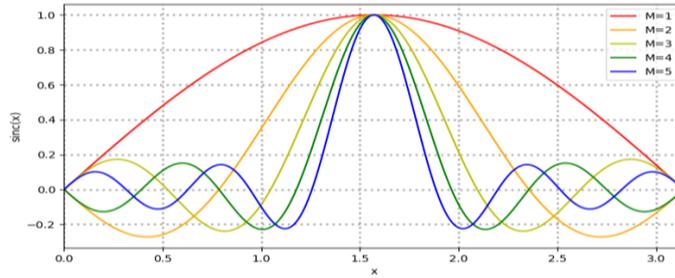


Рис. 1. Усеченная функция $\text{sinc}(x)$, аппроксимированная рядом Фурье при различном числе гармоник M

Оконные функции Ханна и Хемминга представляет собой «обобщенное» окно Хемминга [2], которое является суммой функции косинуса и постоянного уровня, отличных от нуля на отрезке:

$$w(x) = \begin{cases} \sigma + (1 - \sigma) \cos 2x, & -\frac{\pi}{2} \leq x \leq \frac{\pi}{2}, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (2)$$

где σ – коэффициент, принимающий значение 0,5 для окна Ханна и 0,54 для окна Хемминга.

Так как центр функции sinc расположен в точке $\pi/2$, задержим на это значение окно (2) и получим:

$$w(x) = \begin{cases} \sigma - (1 - \sigma) \cos 2x, & 0 \leq x \leq \pi, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{sinc}(x)w(x) = [\sigma - (1 - \sigma) \cos 2x] \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m \sin(2m + 1)x. \quad (4)$$

Выражение (4) можно упростить

$$\text{sinc}(x)w(x) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^M (-1)^m a_m \sin(2m + 1)x, \quad (5)$$

где

$$a_m = \begin{cases} 1, & m < M - 1, \\ \frac{(1 + \sigma)}{2}, & m = M - 1, \\ \frac{(1 - \sigma)}{2}, & m = M. \end{cases}$$

Для примера, решим выражение (5) для $M = 2$ с оконной функции Хэмминга, которая имеет параметр $\sigma = 0,54$.

$$\text{sinc}(x) \cdot w(x) = \frac{1}{2} (\sin x - 0,77 \sin 3x + 0,23 \sin 5x).$$

Как видно из результата, при перемножении сглаживающей функции и суммы двух гармоник возникает новая нечетная гармоника, которая имеет частоту $(2M + 1)x$. Данный результат справедлив для любого числа M и в данном примере при $M = 2$ новая гармоника будет 5-ой (частота в 5 раз больше частоты первой гармоники).

Формирование дискретной ИХ. Зададим формулу для k -го полупериода квазисинусной функции, которая представляет собой аппроксимирующий полином второй степени [4–6]:

$$f_{p2}(n, k) = \begin{cases} (-1)^k (L[n - kL] - [n - kL]^2), & kL \leq n \leq (k + 1)L, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (6)$$

где n – номер отсчета ИХ; k – номер полупериода синусной функции ($k = 0, 1, \dots, K - 1$); L – параметр, характеризующий длительность ИХ.

Тогда квазисинусная функция является суммой всех полупериодов

$$f_{sin}(n) = \sum_k f_{p2}(n, k). \quad (7)$$

Так как при различных значениях L максимальное значение функции $f_{p2}(n, k)$ будет разным, то при сложении или вычитании $f_{sin}(n)$ с различными L следует умножить $f_{sin}(n)$ на нормирующий коэффициент, который вычисляется следующим образом

$$G_m = \frac{\max(f_{sin}(n)|_{L=\max L})}{\max(f_{sin}(n)|_{L=L_m})}, \quad (8)$$

Формула для дискретной ИХ:

$$h(n) = \sum_{m=0}^M a_m G_m f_{sin}(n)|_{L=L_m}. \quad (9)$$

Метод повышения степени аппроксимирующего полинома квазисинусной функции. Использование степенного полинома для аппроксимации импульсной характеристики приводит к возникновению погрешности, которая обусловлена отклонением аппроксимирующей функции от исходной оконной функции [13].

Одним из способов уменьшения ошибки аппроксимации является повышение степени полинома. Далее предлагается следующий алгоритм для выполнения этой задачи в численном виде.

1. Выполнить дискретное интегрирование квазисинусной функции со степенью полинома r .
2. Умножить полученный результат на -1 .
3. Прибавить минимальное значение, деленное на 2.
4. Выполнить дискретное интегрирование.

В результате получится квазисинусная функция со степенью полинома $r + 2$.

Так как усеченная функция sinc, аппроксимированная степенным полиномом, принимает только целые значения, то при сравнении ее с непрерывной функцией sinc необходимо выполнить нормировку путем деления на коэффициент усиления фильтра

$$h'(n) = h(n)/G_h, \quad (10)$$

где $G_h = \max[h(n)]$ – коэффициент усиления фильтра.

На рис. 2 представлены графики усеченной непрерывной функции sinc, взвешенной окном Хэмминга, и ее аппроксимация степенным полиномом с выполненной нормировкой при трех значениях степени: $r = 2$, $r = 4$ и $r = 6$.

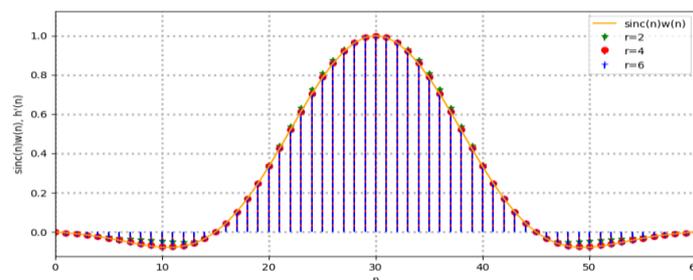


Рис. 2. Усеченная $\text{sinc}(n)$, взвешенная окном Хэмминга, и нормированная ИХ РКИХ-фильтра

Средняя относительная ошибка аппроксимации степенным полиномом

$$E = \frac{100\%}{N+1} \sum_{n=0}^N |\text{sinc}(n) \cdot w(n) - h'(n)| / [\text{sinc}(n) \cdot w(n)], \quad (11)$$

где N – длительность импульсной характеристики; $w(n)$ – окно Хэмминга.

Для полинома второй, четвертой и шестой степени средняя относительная ошибка принимает значение 6,23%, 0,65% и 0,07% соответственно.

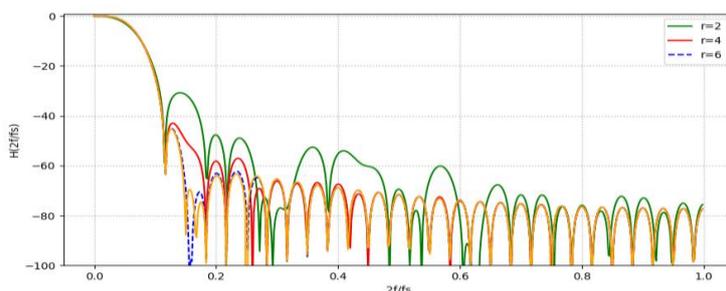


Рис. 3. АЧХ усеченной функции $\text{sinc}(n)$, взвешенная окном Хэмминга, и нормированной ИХ РКИХ-фильтра

Вычисление коэффициентов нерекурсивной части фильтра. Коэффициенты нерекурсивной части фильтра вычисляются через нахождение обратной конечной разности порядка $r + 1$ от ИХ фильтра [13]. Формула вычисления обратной конечной разности функции $f(n)$ имеет вид:

$$\nabla^{r+1} f(n) = \sum_{j=0}^{r+1} (-1)^j C_r^j f(n - j), \quad (12)$$

где C_r^j – биномиальные коэффициенты.

Так как ИХ фильтра представляет собой сумму квазисинусных функций, умноженных на коэффициент G_m , то обратной конечной разностью от ИХ фильтра является сумма их обратных конечных разностей. Подставляя в (12) вместо $f(n)$ квазисинусную функцию, найдем ее обратную конечную разность. На рис. 4–6 изображены коэффициенты для каждой квазисинусной функции (без учета G_m), аппроксимированной степенным полиномом степени r . $L1 - L3$ соответствуют длительностям полупериода квазисинусной функции для 1–3 гармоник соответственно. Следует отметить, что обратная конечная разность от любой рассмотренной квазисинусной функции имеет симметричные относительно центрального отсчета коэффициенты, умноженные на -1 .

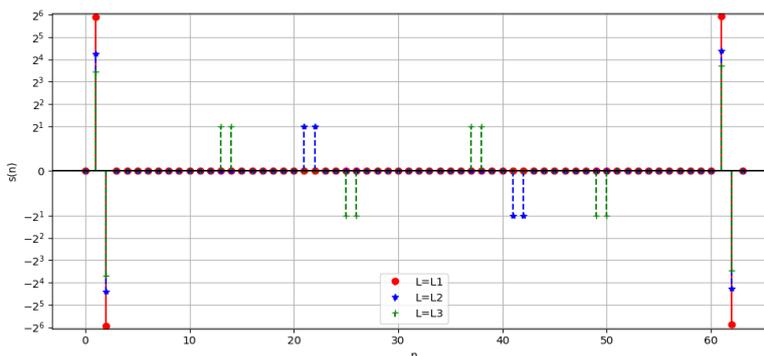


Рис. 4. Конечные разности третьего порядка для квазисинусоид, аппроксимированных полиномом второй степени

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что четвертая степень аппроксимирующего полинома наиболее эффективна, поскольку реализация квазисинусной обратной конечной разности для данной степени характеризуется меньшим количеством ненулевых коэффициентов по сравнению с полиномом шестой степени и обеспечивает

уровень боковых лепестков АЧХ на 13 дБ ниже, чем при использовании полинома второй степени. Кроме того, при переходе к полиному шестой степени коэффициенты превышают 2^{25} , что усложняет аппаратную реализацию, в то время как для полинома четвертой степени коэффициенты не превосходят 2^{16} , что существенно снижает требования к разрядности вычислительных устройств.

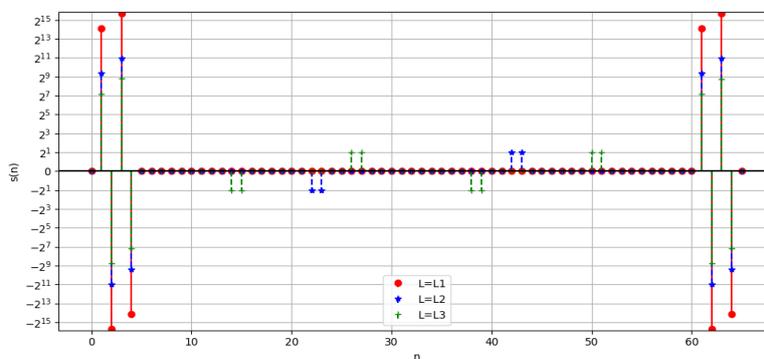


Рис. 5. Конечные разности пятого порядка для квазисинусоид, аппроксимированных полиномом четвертой степени

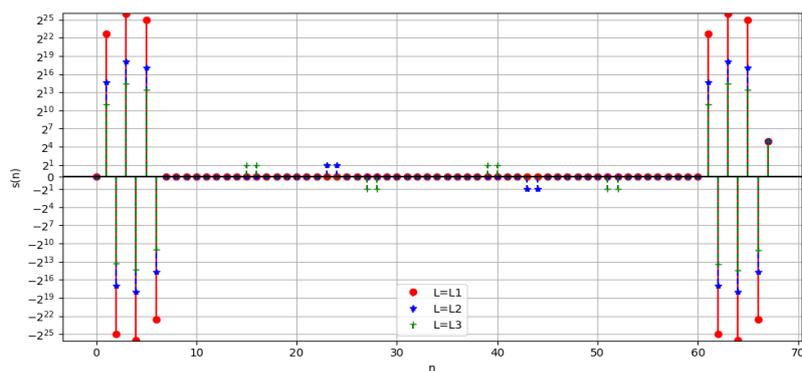


Рис. 6. Конечные разности седьмого порядка для квазисинусоид, аппроксимированных полиномом шестой степени

Заключение. В данной работе была рассмотрена методика синтеза импульсной характеристики (ИХ) цифрового РКИХ-фильтра в виде усеченной и сглаженной оконной функцией Хэмминга функции sinc , представленной суммой квазисинусных функций. Аппроксимация синусоидальных составляющих осуществлялась с помощью степенных полиномов степени r , исследовались случаи $r = 2$, $r = 4$ и $r = 6$. Проведенные расчёты показали высокую точность аппроксимации: для $r = 4$ и $r = 6$ средняя относительная ошибка не превышает 1%, что свидетельствует о высокой точности аппроксимирующих моделей. Для каждой квазисинусоиды были построены графики конечной разности степени $r + 1$, анализ которых позволил сделать следующие выводы: при $r = 2$ получено наименьшее число ненулевых отсчётов (16) при уровне боковых лепестков АЧХ -30 дБ, а при $r = 4$ количество ненулевых отсчётов увеличилось до 20 при улучшении уровня боковых лепестков до -43 дБ. Таким образом, предложенный подход позволяет существенно сократить количество коэффициентов в нерекурсивной части РКИХ-фильтра, что упрощает его аппаратную и программную реализацию. Это особенно важно для ресурсограниченных систем, где критичны вычислительная сложность, энергопотребление и площадь кристалла при аппаратной реализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лайонс Р.* Цифровая обработка сигналов: Второе издание: пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
2. *Рабинер Л., Голд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 216 с.
3. *Богнер Р., Константиноидис А.* Введение в цифровую фильтрацию: пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 216 с.
4. *Бакиун Д.И., Турулин И.И.* Методика построения структуры рекурсивного фильтра с конечной импульсной характеристикой в виде функции, аппроксимирующей окно Ханна // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 64-70.
5. *Турулин И.И.* Расчет и применение быстродействующих цифровых рекурсивных фильтров с конечной импульсной характеристикой: монография / под общей ред. Л.К. Самойлова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 88 с.
6. *Турулин И.И.* Основы теории рекурсивных КИХ-фильтров: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 264 с.
7. *Олейникова Т.В.* Исследование алгоритмов рекурсивных фильтров с конечными импульсными характеристиками для весовой обработки сигналов: дисс. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 1999.
8. *Олейникова Т.В.* Применение быстрой циклической свертки в корреляционном измерителе временных интервалов // Тез. докл. всерос. науч. конф. «Новые информационные технологии. Информационное, программное и аппаратное обеспечение». – Таганрог, 1995. – С. 178-179.
9. *Олейникова Т.В., Турулин И.И.* Весовая обработка близко расположенных сигнала и помехи окнами с характеристиками типа окна Хэмминга // Тез. докл. всерос. науч. конф. «Радиоэлектроника, микроэлектроника, системы связи и управления». – Таганрог, 1997. – С. 232-233.
10. *Blu T., Unser M.* Quantitative Fourier Analysis of Approximation Techniques: Part I—Interpolators and Projectors // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1999. – Vol. 47, No. 10. – P. 2783-2795.
11. *Stenger F.* Numerical Methods Based on Sinc and Analytic Functions. – New York: Springer, 1993. – 565 p.
12. *Unser M.* Splines: A Perfect Fit for Signal and Image Processing // IEEE Signal Processing Magazine. – 1999. – Vol. 16, No. 6. – P. 22-38.
13. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1975.
14. *Lau B.K., Sreeram V.* Design of low order approximately linear phase IIR filters // IEEE Symposium on Advances in Digital Filtering and Signal Processing. – 1998. – P. 92-95.
15. *Maximo A.* Efficient finite impulse response filters in massively-parallel recursive systems // Journal of Real-Time Image Processing: collected papers. – 2015. – Vol. 12. – P. 603-611.
16. *Dam H.H., Nordebo S., Teo K.L., Cantoni A.* Design of linear phase FIR filters with recursive structure and discrete coefficients // IEEE International conference on acoustics, speech, and signal processing: collected papers. – Seattle, 1998. – P. 1269-1272.
17. *Hassan F., Khorbotly S.* Recursive implementation of exponential linear phase FIR filters // 18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems: collected papers. – Beirut, 2011. – P. 559-562.
18. *Sklyarov V.* FPGA-based implementation of recursive algorithms // Microprocessors and Microsystems. Special Issue on FPGAs: Applications and Designs. – 2004. – Vol. 28/5-6. – P. 197-211.
19. *Томас Д.* Логическое проектирование и верификация систем на System Verilog: пер. с англ. А.А. Слинкина, А.С. Камкина, М.М. Чупилко. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 384 с.
20. *Хаханов В.И., Хаханов И.В., Литвинова Е.И., Гузь О.А.* Проектирование и верификация цифровых систем на кристаллах. Verilog & System Verilog. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – 528 с.
21. *Уэйкерли Ф.* Проектирование цифровых устройств. Т. 1. – М.: Постмаркет, 2002. – 544 с.

REFERENCES

1. *Layons R.* Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]: Second ed.: transl. from Engl. Moscow: ООО «Binom-Press», 2006, 656 p.
2. *Rabiner L., Gould B.* Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov [Theory and application of digital signal processing]: transl. from Engl.. Moscow: Mir, 1976, 216 p.
3. *Bogner R., Konstantinidis A.* Vvedenie v tsifrovuyu fil'tratsiyu [Introduction to digital filtering]: transl. from Engl. Moscow: Mir, 1976, 216 p.
4. *Bakshun D.I., Turulin I.I.* Metodika postroeniya struktury rekursivnogo fil'tra s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy v vide funktsii, approksimiruyushchey okno Khanna [A technique for constructing the structure of a recursive filter with a finite impulse response in the form of a function approximating the Hann window], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 3, pp. 64-70.

5. *Turulin I.I.* Raschet i primeneniye bystrodeystvuyushchikh tsifrovyykh rekursivnykh fil'trov s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy: monografiya [Calculation and application of high-speed digital recursive filters with finite impulse response: monograph], under the general ed. of L.K. Samoylova. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1999, 88 p.
6. *Turulin I.I.* Osnovy teorii rekursivnykh KIKh-fil'trov: monografiya [Fundamentals of the theory of recursive FIR filters: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 264 p.
7. *Oleynikova T.V.* Issledovanie algoritmov rekursivnykh fil'trov s konechnymi impul'snymi kharakteristikami dlya vesovoy obrabotki signalov: diss. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of algorithms for recursive filters with finite impulse characteristics for weight signal processing: cand. of eng. sc. diss.]. Taganrog, 1999.
8. *Oleynikova T.V.* Primeneniye bystroy tsiklicheskey svertki v korrelyatsionnom izmeritele vremennykh intervalov [The use of fast cyclic convolution in a correlation time interval meter], *Tez. dokl. vseros. nauch. konf. "Novye informatsionnye tekhnologii. Informatsionnoe, programmnoe i apparatnoe obespechenie"* [Abstracts of the All-Russian Scientific Conference "New Information Technologies. Information, Software, and Hardware"]. Taganrog, 1995, pp. 178-179.
9. *Oleynikova T.V. Turulin I.I.* Vesovaya obrabotka blizko raspolozhennykh signala i pomekhi oknami s kharakteristikami tipa okna Khemmignya [Weight processing of closely spaced signal and interference by windows with characteristics of the type of a Hammign window], *Tez. dokl. vseros. nauch. konf. «Radioelektronika, mikroelektronika, sistemy svyazi i upravleniya»* [Abstracts of reports of the All-Russian scientific conference "Radioelectronics, microelectronics, communication and control systems"]. Taganrog, 1997, pp. 232-233.
10. *Blu T., Unser M.* Quantitative Fourier Analysis of Approximation Techniques: Part I—Interpolators and Projectors, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, Vol. 47, No. 10, pp. 2783-2795.
11. *Stenger F.* Numerical Methods Based on Sinc and Analytic Functions. New York: Springer, 1993, 565 p.
12. *Unser M.* Splines: A Perfect Fit for Signal and Image Processing, *IEEE Signal Processing Magazine*, 1999, Vol. 16, No. 6, pp. 22-38.
13. *Bronshcheyn I.N., Semendyaev K.A.* Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov [Handbook of Mathematics for engineers and university students]. Moscow: Nauka, 1975.
14. *Lau B.K., Sreeram V.* Design of low order approximately linear phase IIR filters, *IEEE Symposium on Advances in Digital Filtering and Signal Processing*, 1998, pp. 92-95.
15. *Maximo A.* Efficient finite impulse response filters in massively-parallel recursive systems, *Journal of Real-Time Image Processing: collected papers*, 2015, Vol. 12, pp. 603-611.
16. *Dam H.H., Nordebo S., Teo K.L., Cantoni A.* Design of linear phase FIR filters with recursive structure and discrete coefficients, *IEEE International conference on acoustics, speech, and signal processing: collected papers*. Seattle, 1998, pp. 1269-1272.
17. *Hassan F., Khorbotly S.* Recursive implementation of exponential linear phase FIR filters, *18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems: collected papers*. Beirut, 2011, pp. 559-562.
18. *Sklyarov V.* FPGA-based implementation of recursive algorithms, *Microprocessors and Microsystems. Special Issue on FPGAs: Applications and Designs*, 2004, Vol. 28/5-6, pp. 197-211.
19. *Tomas D.* Logicheskie proektirovaniye i verifikatsiya sistem na System Verilog [Logical design and verification of the Verilog system]: transl. from Engl. A.A. Slinkina, A.S. Kamkina, M.M. Chupilko. Moscow: DMK Press, 2019, 384 p.
20. *Khakhanov V.I., Khakhanov I.V., Litvinova E.I. Guz' O.A.* Proektirovaniye i verifikatsiya tsifrovyykh sistem na kristallakh. Verilog & System Verilog [Design and verification of digital systems on crystals. Verilog and the Verilog system]. Khar'kov: KHNURE, 2010, 528 p.
21. *Ueykerli F.* Proektirovaniye tsifrovyykh ustroystv [Design of digital devices]. Vol. 1. Moscow: Postmarket, 2002, 544 p.

Бакшун Дмитрий Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: bakshun@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185988588; аспирант.

Турулин Игорь Ильич – Южный федеральный университет; e-mail: iiturulin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79618170609; д.т.н.; профессор.

Bakshun Dmitry Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: bakshun@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185988588; postgraduate student.

Turulin Igor Pyich – Southern Federal University; e-mail: iiturulin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79618170609; cand. of eng. sc.; professor.

Раздел IV. Машинное обучение и нейронные сети

УДК 004.383

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-229-239

Н.А. Бочаров, Н.Б. Парамонов

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Современные робототехнические комплексы решают всё более сложные задачи, что предъявляет повышенные требования к быстродействию и эффективности бортовых вычислительных систем. Традиционные методы наращивания производительности (масштабирование аппаратуры, параллельные вычисления и др.) уже приближаются к своим пределам, поэтому возникает необходимость поиска принципиально новых подходов. Квантовые вычисления рассматриваются как перспективное направление, способное значительно превзойти классические вычислительные мощности в ряде задач. В этой связи целью данного исследования является изучение применимости квантовых вычислений для бортовых вычислительных систем робототехнических комплексов (РТК). Для достижения поставленной цели проведён всесторонний анализ требований (производительность, энергопотребление, массогабаритные показатели, надёжность и др.), предъявляемых к бортовым вычислительным системам РТК. Оценён потенциал квантовых алгоритмов в решении типовых задач робототехники, в том числе оптимизационных задач и задач машинного обучения, и проведено их имитационное моделирование с последующим сравнением результатов с классическими методами. Кроме того, рассмотрены текущие ограничения современных квантовых компьютеров (например, ограниченное число кубитов и проблемы декогеренции) и на основе тенденций развития технологий сделан прогноз их совершенствования в ближайшие годы. Проведённое исследование подтверждает перспективность применения квантовых вычислений для решения задач оптимизации и машинного обучения, которые являются ключевыми для интеллектуальных РТК. Однако текущие технологические ограничения (габариты, требования к условиям работы и нестабильность квантовых процессоров) пока не позволяют использовать квантовые компьютеры непосредственно на борту. Тем не менее, предложены направления дальнейших исследований и рассмотрены возможные сценарии постепенного внедрения квантовых вычислений в архитектуру РТК в ближайшие 5–15 лет, например, по мере миниатюризации квантовых процессоров и развития методов их интеграции в бортовые системы. Таким образом, по мере устранения существующих барьеров квантовые вычислители могут со временем стать неотъемлемой частью бортовых систем управления РТК, обеспечивая качественный скачок в их производительности.

Бортовые вычислители; бортовые вычислительные системы; робототехника; квантовые вычисления; квантовые компьютеры; моделирование.

N.A. Bocharov, N.B. Paramonov

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF QUANTUM COMPUTING IN ONBOARD COMPUTING SYSTEMS OF ROBOTIC COMPLEXES

Modern robotic systems are solving increasingly complex tasks, imposing higher demands on the speed and efficiency of onboard computing systems. Traditional methods of increasing performance (scaling hardware, parallel computing, etc.) are approaching their limits, necessitating the search for fundamentally new approaches. Quantum computing is considered a promising direction that could significantly surpass classical computational capabilities in certain tasks. In this regard, the goal of this study is to explore the applicability of quantum computing for onboard computing systems in robotic complexes (RCs). To achieve this goal, a comprehensive analysis of the requirements (performance, energy consumption, size and weight constraints, reliability, etc.) for onboard computing systems of RCs has been conducted. The potential of quantum algorithms in solving typical robotic tasks, including optimization prob-

lems and machine learning, has been assessed, followed by simulation modeling and comparison with classical methods. Additionally, current limitations of modern quantum computers (e.g., limited qubit count and decoherence issues) have been examined, and a forecast has been made regarding their development in the coming years based on technological trends. The study confirms the promising application of quantum computing for solving optimization and machine learning problems, which are critical for intelligent RCs. However, current technological limitations (size, operational conditions, and instability of quantum processors) do not yet allow for their direct use onboard. Nevertheless, directions for further research have been proposed, and possible scenarios for the gradual integration of quantum computing into RC architectures over the next 5–15 years have been considered, particularly as quantum processors become more compact and methods for integrating them into onboard systems improve. Thus, as existing barriers are overcome, quantum computers may eventually become an integral part of onboard control systems for RCs, providing a significant leap in their performance.

Onboard computers; robotics; quantum computing; modeling.

Введение. Управление современными автономными робототехническими комплексами (РТК) осуществляются с помощью специализированных бортовых вычислительных систем (БВС) [1]. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать БВС, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. Современные и перспективные технологии искусственного интеллекта на основе искусственных нейронных сетей требуют существенного роста вычислительных мощностей для обеспечения высоких выходных показателей. Вместе с этим нерешенной остается проблема обеспечения надежности БВС, основным методом решения которой остается введение различного рода избыточности. В том числе – резерва производительности [2].

Совокупность этих условий диктует необходимость дальнейшего роста вычислительной мощности БВС. Однако, существующие технологии кремниевой микроэлектроники приближаются к своему пределу и уже не успевают увеличивать производительность вычислительных устройств соответственно увеличению потребности вычислительных ресурсов новыми алгоритмами. Такие задачи в робототехнических комплексах сейчас выполняются с помощью высокопараллельных устройств, например, графических процессоров. Квантовые компьютеры способны предложить новые подходы к решению таких задач за счёт явлений суперпозиции и квантового параллелизма. Хотя полностью “квантовых” роботов в ближайшее время не предвидится, в литературе уже обсуждались концепции квантовых роботов [3, 4].

Целью данной работы является исследование применимости квантовых вычислений для БВС РТК. Приведены оценки ускорения основных задач РТК с использованием квантовых вычислений, полученные на моделирующем стенде.

Основы квантовых вычислений. Кубиты и принцип суперпозиции. Квантовый бит или кубит – базовый элемент информации в квантовом компьютере. В отличие от классического бита, принимающего значение 0 или 1, кубит может находиться в состоянии суперпозиции двух базовых состояний одновременно. Математически состояние кубита выражается как линейная комбинация:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \alpha^2 + \beta^2 = 1$$

где $|0\rangle$ и $|1\rangle$ – базисные состояния, а комплексные коэффициенты α и β определяют амплитуды вероятностей этих состояний. При измерении квантовое состояние коллапсирует в одно из базисных значений, нарушая суперпозицию. Кроме того, два и более кубита могут находиться в состоянии запутанности. Суперпозиция и запутанность принципиально отличают квантовые вычисления от классических и позволяют обрабатывать сразу множество состояний параллельно.

Квантовые вычисления осуществляются с помощью квантовых логических гейтов (вентилей), которые представляют собой унитарные преобразования над состояниями кубитов. Квантовый гейт – это матрица размером $2^m \times 2^m$, где m – количество кубитов, на которые воздействует гейт. Квантовая схема – это последовательность преобразований из конечного набора гейтов. Результат ее работы вероятностный.

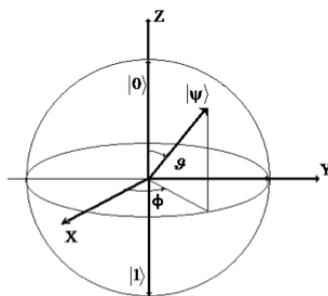


Рис. 1: Сфера Блоха – геометрическая визуализация состояния одного кубита.

Главным отличием квантовой модели является экспоненциальный рост размерности состояния системы с числом кубитов: n кубитов описываются 2^n амплитудами. Это означает, что квантовый регистр из n кубитов может охватить суперпозицию 2^n разных значений одновременно. Квантовые алгоритмы стремятся использовать это свойство, проводя вычисления одновременно над множеством вариантов решения (квантовый параллелизм). В некоторых задачах это приводит к существенному ускорению по сравнению с лучшими классическими алгоритмами.

Современные достижения в области квантовых компьютеров. На сегодняшний день ведущими центрами разработки квантовых компьютеров являются IBM, Google, Rigetti, IonQ и др., которые создали прототипы квантовых процессоров с различными архитектурами. Такие эксперименты показали принципиальную работоспособность квантовых устройств для задач, непосильных классическим вычислительным системам, хотя практическая полезность продемонстрированной задачи пока ограничена.

Помимо сверхпроводящих кубитов (IBM и Google), развиваются и другие технологии: ионные ловушки (IonQ и др.) – где роль кубитов выполняют холодные ионы, захваченные электромагнитным полем; фотонные квантовые компьютеры (Xanadu); квантово-отжиговые устройства (D-Wave) – специализированные системы для решения оптимизационных задач методом квантового отжига.

Одной из главных проблем на пути создания полезных квантовых компьютеров остаётся высокая ошибкообразующая среда: кубиты чрезвычайно чувствительны к помехам, быстро теряют когерентность, а квантовые логические операции пока имеют ненулевую вероятность ошибки (типичные показатели – ошибки порядка 10^{-3} – 10^{-4} на элементарный шаг).

Ожидается, что в течение следующих лет количество кубитов и их качество (коэффициенты когерентности, точность операций) будут значительно расти. Согласно публичной «дорожной карте» IBM, к 2025 году планируется создать многокластерную систему с суммарно >1000 кубитами, а к 2033 году – квантовый комплекс с тысячами логических кубитов.

Требования к БВС РТК. БВС РТК часто работают в условиях жёстких ограничений по массо-габаритным параметрам и энергопотреблению (так называемые ограничения SWaP – Size, Weight and Power). С ростом уровня автономности вычислительная нагрузка ещё более возрастает. Таким образом, в современных РТК наблюдается конфликт между стремлением повысить производительность вычислений и жёсткими ограничениями на бортовые ресурсы. Кроме того, для отдельных сфер (например, космические аппараты, длительно автономные роботы) критичны требования надёжности и отказоустойчивости: БВС должна стабильно работать в условиях неблагоприятных воздействий.

БВС РТК должны обеспечивать решение широкого круга задач: обработка сигналов с датчиков (лидаров, камер, радаров), одновременная локализация и построение карты (SLAM), планирование маршрутов и траекторий движения, распознавание объектов, контроль за исполнением задач, коммуникация с другими агентами и т.д. Многие из этих задач предъявляют высокие требования к производительности из-за их алгоритмической

сложности. Современные системы зачастую используют нейросетевые алгоритмы, что требует наличия производительных GPU/TPU прямо на роботе для выполнения инференса нейронных сетей. Таким образом, в БВС РТК важно сочетание высокой производительности с энергоэффективностью и надёжностью.

В большинстве робототехнических применений важно гарантировать выполнение вычислительных задач в жёстких временных рамках (реальное время) для безопасного управления. Классические БВС достигают этого проверенными архитектурами, например, резервированием модулей, использованием операционных систем реального времени, детерминистских алгоритмов.

Подводя итог, можно сказать, что идеальный вычислитель для РТК должен сочетать высокую производительность с низкими массогабаритными показателями и энергопотреблением, а также обеспечивать надёжную работу в режиме реального времени.

Применимость квантовых вычислений в БВС РТК. Современные квантовые компьютеры далеки от того, чтобы удовлетворять ограничениям по размеру и энергии, необходимым для бортового применения. Большинство действующих квантовых процессоров представляют собой стационарные установки, требующие криогенного охлаждения до мили-Кельвиновых температур, массивной вакуумной изоляции и чувствительного оборудования для управления кубитами. Кроме того, квантовые процессоры чрезвычайно чувствительны к вибрациям и внешним воздействиям: даже малейшее электромагнитное или механическое возмущение приводит к потере когерентности кубитов. Для робототехники, где платформа подвержена постоянным динамическим нагрузкам, это критическое ограничение.

Однако необходимо отметить параллельные усилия по миниатюризации и «облегчению» квантовых вычислителей. К примеру, Quantum Brilliance разрабатывает квантовый акселератор на основе центров азота-вакансия в искусственном алмазе, способный работать без охлаждения и обладающий форм-фактором, близким к печатной плате [5]. Планируется, что к 2025 году такой ускоритель будет содержать порядка 50 кубитов в корпусе размером с видеокарту. На данный момент подобные устройства – экспериментальные прототипы, но тенденция очевидна: прогресс в квантовой элементной базе идёт в сторону уменьшения систем и ослабления экстремальных требований.

Несмотря на данные сложности, можно выделить области робототехники, где даже ограниченные возможности квантовых вычислений могли бы дать серьезные преимущества, и где поэтому их внедрение наиболее перспективно:

- ◆ Автономные наземные системы. Крупные беспилотные автомобили, роботы для складской логистики или военной техники, которые обладают большей грузоподъёмностью и энергоресурсами.

- ◆ Стационарные или крупные морские/воздушные системы. Роботы, установленные на кораблях, больших подводных аппаратах или стационарных платформах, могут размещать громоздкое оборудование. Если, например, подводный исследовательский аппарат обеспечен судном-носителем, на борту судна может находиться квантовый компьютер, помогающий в сложных вычислениях. Для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) ситуация сложнее: малые дроны сильно ограничены в массе, а крупные беспилотники наподобие UAV самолётного типа имеют больше возможностей, но всё же в воздухоплавании вес и надёжность – первостепенные факторы. Вероятно, авиационные РТК станут одной из последних сфер, где квантовый сопроцессор появится на борту.

- ◆ Многоагентные и облачные робототехнические системы. Здесь квантовые вычисления могут применяться не на каждом роботе, а в облачной инфраструктуре, связывающей целый рой роботов. Например, рой дронов или колония роботов может отправлять задачи оптимизации или обучения на мощный квантовый сервер, а затем получать решения. Пока квантовые вычислители громоздки, подобная архитектура «робот + квантовое облако» выглядит наиболее практически осуществимой.

Зачем же робототехническим комплексам может понадобиться такая экзотическая и сложная технология, как квантовый компьютер? Ответ кроется в тех самых задачах, которые либо вообще не решаются классическими методами при увеличении масштаба, либо

решение требует непомерных ресурсов или времени. Если квантовый алгоритм предлагает хотя бы полиномиальное ускорение, а тем более экспоненциальное, для ключевой задачи робота, это может стать революционным преимуществом. Примеры включают:

- ◆ Комбинаторные задачи оптимизации. Планирование маршрутов для десятков одновременно движущихся роботов, распределение сотен задач между роботами, оптимизация логистических операций – все эти задачи крайне тяжёлые вычислительно. Квантовые алгоритмы могут дать квадратичный выигрыш (Grover-подобные поисковые методы) или приблизительный экспоненциальный (вариационные алгоритмы).

- ◆ Обработка больших массивов сенсорных данных. В условиях, когда робот оснащён множеством датчиков высокого разрешения, объем данных может зашкаливать. Квантовые методы обработки сигналов (например, квантовое преобразование Фурье) потенциально могут справляться с такими объёмами эффективнее.

- ◆ Квантовое машинное обучение для когнитивных функций. Если роботу требуется распознавать сложные образы, прогнозировать поведение окружающих объектов или обучаться новым навыкам на лету, квантовые машинные learning-алгоритмы могут предоставить ускорение.

Таким образом, квантовые вычисления для РТК оправданы там, где без них задача либо не решается вовремя, либо решается неоптимально.

Квантовые алгоритмы для задач РТК. В робототехнике множество задач сводятся к поиску оптимального решения среди очень большого числа вариантов: планирование пути, распределение целей между роботами, оптимизация энергопотребления, разбиение области на секторы патрулирования и т.д. Одним из наиболее известных квантовых алгоритмов является алгоритм Гровера – квантовый алгоритм неструктурированного поиска [6]. Он находит требуемый элемент среди N возможных за $O(\sqrt{N})$ шагов, тогда как классическому полному перебору нужно $O(N)$ операций. В уже упоминавшейся концепции «квантового робота» было продемонстрировано, что квантовый поиск может уменьшить сложность типового задания с $O(2^N)$ до около $O(N\sqrt{N})$.

Для задач оптимизации комбинаторного типа разработаны специальные алгоритмы, такие как квантовый отжиг и квантовый алгоритм приближённой оптимизации QAOA [7]. Квантовый отжиг эффективно находит приближенные решения NP-трудных задач (например, задачи о назначениях, раскраски графов, оптимального маршрута). QAOA же может выполняться на универсальном квантовом компьютере, чередуя квантовые эволюции и классические шаги оптимизации. Для ряда типичных задач (кластеризация, покрытие, max-cut на графе) уже на малых примерах QAOA демонстрирует конкурентные результаты с классическими жадными алгоритмами.

Квантовое машинное обучение (QML). Роботы всё шире применяют методы искусственного интеллекта и машинного обучения – от распознавания объектов камерой до принятия решений с помощью обученных моделей. Квантовое машинное обучение обещает ускорить некоторые из таких алгоритмов. Например, для задач восприятия часто применяется метод основных компонент (PCA) [8] для снижения размерности данных (выделения главных особенностей изображения или облака точек). Был предложен квантовый алгоритм для PCA (так называемый квантовый PCA), который обеспечивает экспоненциальное ускорение по сравнению с классическим алгоритмом на матрицах большой размерности.

Навигационные задачи часто требуют решения систем линейных алгебраических уравнений – например, при вычислении местоположения методом триангуляции или при фильтрации (внутри фильтра Калмана робот решает матричные уравнения). Существует квантовый алгоритм для решения линейных уравнений – алгоритм Гарроу–Хассидима–Ллойда (HHL) [9], который при определённых условиях решает систему значительно быстрее классических методов линейной алгебры. Теоретически HHL достигает временной сложности $O(\text{poly}(\log N))$ для матрицы размера $N \times N$ (при разреженной матрице и некоторых дополнительных допущениях), тогда как лучшая классическая сложность – $O(N^3)$, либо $O(N^2)$ для разреженных матриц. Даже упрощённая оценка даёт ускорение с $O(N^3)$ до $O(N^2)$.

Другой аспект – квантовые преобразования Фурье (QFT), лежащие в основе многих квантовых алгоритмов. QFT выполняется за $O(n^2)$ операций (для 2^n -размерного вектора), тогда как классическое дискретное преобразование Фурье (DFT) – за $O(N \log N)$. В задачах обработки сигналов радаров, сонаров, лидаров, где необходимо быстро анализировать спектры сигналов, квантовый подход может теоретически ускорить вычисления.

Моделирование и оценка результатов. На текущем этапе развития квантовых вычислений основным способом испытать квантовый алгоритм в задаче робототехники является использование квантовых симуляторов – программных инструментов, которые эмулируют работу квантового компьютера на классической машине. Авторами статьи разработан моделирующий стенд для оценки эффективности решения задач БВС РТК с помощью квантовых компьютеров (далее – моделирующий стенд) [10], являющийся эффективной реализацией процесса квантовых вычислений для отечественной аппаратно-программной платформы. Моделирующий стенд был реализован в виде комплекса экспериментальных программ на доверенной высокопроизводительной аппаратно-программной среде «Эльбрус».

При разработке моделирующего стенда учитывался опыт зарубежных разработок в области моделирования квантовых вычислений, таких как QuEST, Intel Quantum Simulator, Qiskit, Quantum Inspire и др. Разработанный моделирующий стенд состоит из трёх частей: интерфейсной, веб-приложения и вычислительной и функционирует в двух режимах:

1. Режим чистого состояния, в котором регистр представлен вектором состояния. В данном режиме достигается максимальная производительность за счет относительно невысоких потребностей в оперативной памяти. Количество моделируемых кубитов около 30 на персональном компьютере и до 40 на суперкомпьютере.

2. Режим смешанного состояния, в котором регистр представлен матрицей плотности. Необходимая оперативная память при увеличении числа кубитов растет с квадратичной зависимостью по сравнению с режимом чистых состояний. Число моделируемых кубитов около 15.

Результатом работы моделирующего стенда в стандартном режиме является гистограмма распределения состояний кубитов после серии измерений. На рис. 2 представлено основное окно программы после выполнения алгоритма Гровера для 9 кубитов.

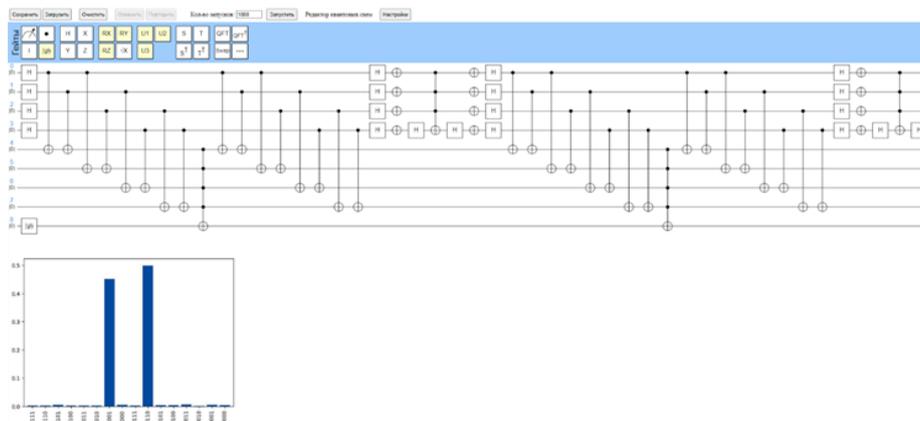


Рис. 2. Основное окно программной модели после выполнения алгоритма Гровера для 9 кубитов

С использованием разработанного моделирующего стенда проведены эксперименты по оценке эффективности квантовых алгоритмов на типовых задачах РТК.

Планирование пути робототехнических комплексов. Эффективное планирование движения является ключевой проблемой при реализации многих робототехнических систем. В настоящее время существует большое количество частных решений данной задачи,

однако говорить о её общем успешном решении пока рано. Большинство из решений является узкоспециализированным и не может быть адаптировано для более широкого круга прикладных задач [11]. Одной из частных задач, решаемых при планировании маршрутов робототехнических комплексов, является задача коммивояжера. В качестве исходных данных на площади S берется множество N вершин графов, которые связаны между собой дорожно-транспортной сетью. Из возможных вариантов маршрутов необходимо выбрать близкий к оптимальному маршрут движения коммивояжера между вершинами графа.

Алгоритм, основанный на полном переборе вариантов, не является самым эффективным в смысле быстродействия. В работе [12] доказано, что не существует алгоритма решения, имеющего степенную сложность. Всё это делает задачу коммивояжера трансовычислительной для ЭВМ с последовательным выполнением операций, если n хоть сколько-нибудь велико.

Рассмотрим квантовый подход к решению этой задачи. Представим задачу в терминах графов: города представляются в виде вершин, а пути в виде ребер. Заданные расстояния между городами кодируются в виде фаз. Каждый город соединён с другими городами с определённой стоимостью, связанной с каждым соединением. Строятся унитарные операторы, собственными векторами которых являются состояния вычислительного базиса, а собственными значениями – различные комбинации этих фаз. К определённым собственным состояниям применяется алгоритм оценки фаз, что даёт все возможные суммарные расстояния для всех маршрутов. Результаты перебираются с помощью алгоритма квантового поиска минимума для получения наименьшего возможного расстояния и пройденного маршрута. Это даёт квадратичное ускорение по сравнению с классическим методом перебора для большого числа городов. Данный квантовый алгоритм кодируется в следующую квантовую схему (рис. 3):

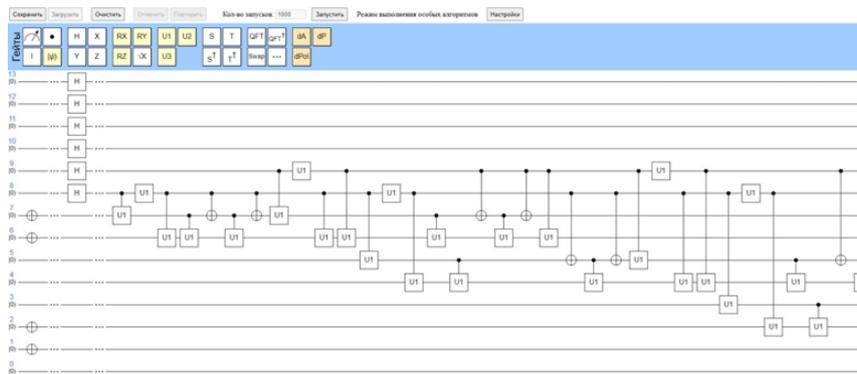


Рис. 3. Квантовая схема задачи коммивояжера для первого собственного значения

Вышеописанный процесс должен быть выполнен для всех собственных значений, чтобы найти общее расстояние для всего маршрута. После этого с помощью алгоритма квантового поиска находим минимальное из этих расстояний. Таким образом, требуемое время зависит от числа собственных состояний.

Используя предложенный алгоритм, можно создать базу данных всех возможных маршрутов, которые могут быть проложены с указанием расстояния до каждого из них. Сложность нахождения минимума составляет $O(\sqrt{N})$, соответственно сложность всей задачи при решении с помощью квантового алгоритма составит $O(\sqrt{(N-1)!})$. При этом классический алгоритм имеет сложность $O((N-1)!)$. Таким образом, даже при небольших $N = 10$ квантовый алгоритм имеет преимущество $(10-1)!/\sqrt{(10-1)!} \sim 600$ раз. С ростом N ускорение растёт экспоненциально: при $N=20$ ускорение составит $3,5 \cdot 10^8$.

Техническое зрение наземных робототехнических комплексов. Важной частью любой процедуры обнаружения объектов на изображении является обнаружение краёв, который используется в современных классических алгоритмах обработки изображений

для выделения структуры объектов/функций, и может занимать до 50% времени на обработку. Квантовая обработка изображений позволяет в некоторых случаях получить экспоненциальное ускорение [13] по сравнению с классической обработкой изображений.

В общем случае классические алгоритмы обнаружения границ основаны на вычислении градиентов изображения, то есть на определении мест на изображении для переходов интенсивности от тёмного к светлому (или от светлого к тёмному). Следовательно, наихудшая временная сложность для большинства из них составляет $O(2^n)$ [16]. Это означает, что для определения градиентов необходимо обрабатывать каждый пиксель в отдельности.

Квантовые алгоритмы обнаружения границ, такие как QSobel [14], обеспечивают экспоненциальное ускорение по сравнению с существующими классическими алгоритмами обнаружения границ. Однако в алгоритме есть несколько шагов, которые делают его весьма неэффективным, например, операция CNOT и квантовый «чёрный ящик» для вычисления градиентов всех пикселей. Для обеих операций на сегодняшний день не известно ни одной эффективной практической реализации. Эта проблема решается использованием алгоритма Quantum Hadamard Edge Detection (QHED) [15]. Схема алгоритма представлена на рис. 4.

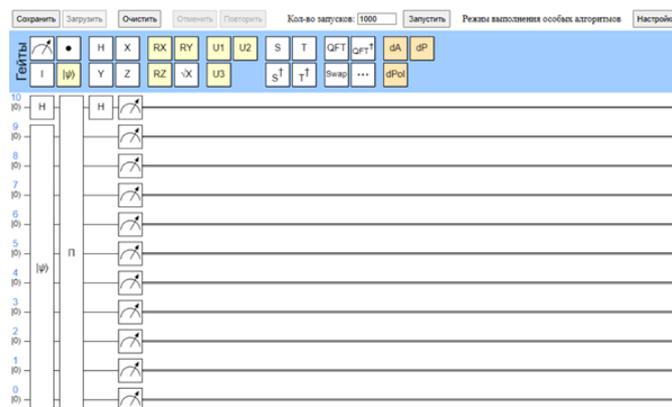


Рис. 4. Схема квантового алгоритма обнаружения границ

С другой стороны, алгоритм QSobel имеет сложность $O(n^2)$ и использует представление изображения FRQI для кодирования $N \times N$ -пиксельного изображения ($N=2^n$) в n -кубитной квантовой системе. Однако представление изображения FRQI имеет сложный процесс подготовки состояния ($O(n)+O(\log^2 n)$) в худшем случае и требует большего количества кубитов ($1+2N$) для хранения данных изображения.

В алгоритме QHED применена более эффективная схема кодирования изображения (QPIE), использующая амплитудное кодирование, что приводит к экспоненциальному уменьшению числа используемых кубитов ($n=\lceil \log_2 N \rceil$). Однако временная сложность этапа подготовки состояния для кодирования изображения с помощью QPIE несколько выше, чем у FRQI – $O(n^2)$. Поскольку QHED эффективно использует свойство гейта H, удаётся достичь временной сложности процедуры обнаружения границ $O(1)$ (без учёта подготовки состояния и перестановки амплитуд) в размере, что значительно меньше, чем для QSobel. Таким образом, алгоритм QHED даёт суперэкспоненциальное ускорение по сравнению с классическими алгоритмами и полиномиальное по сравнению с алгоритмом QSobel.

Ещё один аспект, на который необходимо обратить внимание для обеспечения работы квантового алгоритма, – это количество измерений, которое необходимо провести для получения значительной точности алгоритма. Как правило, для квантовой схемы требуется $O(2^n)$ измерений, чтобы получить хорошую точность выходных вероятностей. Однако, если задача состоит только в том, чтобы обнаружить некоторые специфические закономерности в изображении, можно провести измерение одной локальной наблюдаемой с числом измерений порядка $O(n^2)$ [14].

Таким образом, вычислительная сложность между классическим и квантовым без учёта измерений отличается в 2^n раз. При учёте необходимости n^2 измерений для $n=10$ разница составит $2^{10}/10^2 = 10,24$ раз. Добавим учёт времени, необходимого на кодирование изображения в квантовый регистр $2^n/n^2/n^2$. При $n=10$ разница составит $2^{10}/10^2/10^2 = 5,12$. С ростом n ускорение растёт экспоненциально. При $n=20$ ускорение составит 1310 раз.

Ограничения и перспективы. Несмотря на впечатляющий прогресс, квантовые компьютеры всё ещё находятся на ранней стадии развития и сталкиваются с серьёзными препятствиями на пути к практическому применению [17]. Одним из главных ограничений является декогеренция кубитов – утрата квантовых свойств под воздействием внешней среды [18].

Другой серьёзный вызов – масштабируемость [19]. Хотя число кубитов в экспериментальных процессорах растёт, удержание связности и управляемости всех этих кубитов – сложная инженерная задача. Требуется масштабировать системы охлаждения, электронику для управления и чтения кубитов, подвод сигнальных линий. Для бортовых систем это прямо сейчас выглядит неприемлемо.

Также программное обеспечение и алгоритмы квантовых компьютеров пока в значительной степени отстают от классических [20]. Разработчикам приходится осваивать новые подходы к программированию, зачастую на уровне квантовых схем и матриц, что порогово по сложности.

Наконец, стоимость и доступность: квантовые вычислители сейчас чрезвычайно дороги в изготовлении и обслуживании, и доступны лишь в нескольких лабораториях в мире или через облачные сервисы. Даже когда они станут коммерческими, это всё ещё будут дорогие устройства, требующие специальных условий.

С учётом указанных ограничений, можно считать, что массового появления квантовых вычислителей на каждом роботе ожидать не стоит в ближайшем десятилетии. Однако для отдельных, наиболее требовательных приложений, первые образцы могут появиться уже через 5-10 лет. Для полноценных же бортовых квантовых компьютеров, которые работают на роботе автономно, без внешней инфраструктуры, потребуются комнатнотемпературные кубиты, интегрируемые в компактный корпус. При оптимистичном сценарии, первые прототипы таких устройств могут появиться к концу 2020-х – началу 2030-х годов, но их внедрение в реальную робототехнику займёт ещё время для доводки надёжности.

Заключение. Настоящее исследование посвящено анализу потенциала квантовых вычислений в составе бортовых вычислительных комплексов робототехнических систем. Сформулированный авторами прогноз можно резюмировать следующим образом. Краткосрочный горизонт ($\approx 5-7$ лет) предполагает сугубо вспомогательное использование квантовых ресурсов: вычисления будут выполняться вне самого робота, в удалённых квантовых центрах, решая задачи пред- и пост-обработки – миссионное планирование, маршрутизацию, крупные оптимизационные расчёты, где допустимы задержки, связанные с передачей данных. Среднесрочный интервал ($\approx 7-15$ лет) ожидаемо характеризуется появлением гибридных архитектур, в которых робот запрашивает облачный квантовый модуль для вычисления критически важных подзадач, оставаясь при этом в контуре реального времени. Долгосрочная перспектива (15+ лет) предусматривает интеграцию квантовых сопроцессоров непосредственно в бортовую аппаратуру, что позволит перенести часть вычислительной нагрузки на внутренние ресурсы и тем самым вывести автономность и энергоэффективность РТК на принципиально новый уровень.

Для верификации данных прогнозов авторы разработали специализированный стенд имитационного моделирования, на котором оценена производительность характерных квантовых алгоритмов. Результаты подтверждают, что при использовании квантовых вычислителей возможен экспоненциальный выигрыш по времени решения ключевых задач РТК – навигации, планирования траекторий и технического зрения – что, в свою очередь, обосновывает предложенный поэтапный сценарий их внедрения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Ч. 3. Экстремальная робототехника // Российский технологический журнал. – 2020. – Т. 8, № 3 (35). – С. 14-32.
2. Бочаров Н.А. Моделирование алгоритмов катастрофоустойчивости групп роботов на программно-аппаратной платформе "Эльбрус" // Радиопромышленность. – 2019. – № 3. – С. 8-14.
3. Соколов О.А., Бербер М.О. Перспективы использования квантовых компьютеров в космической авиации // Научный лидер. – 2023. – № 21 (119).
4. Mannone M., Seidita V., Chella A. Quantum computing for swarm robotics: a local-to-global approach // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. – 2025. – Vol. 383. – Art. 20240139.
5. Doherty M. Quantum accelerators: a new trajectory of quantum computers // *Digitale Welt*. – 2021. – Vol. 5, No. 2. – P. 74-79.
6. Grover L.K. Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack // *Physical Review Letters*. – 1997. – Vol. 79, No. 2. – P. 325-328.
7. Farhi E., Goldstone J., Gutmann S. A quantum approximate optimization algorithm // arXiv preprint. – 2014. – arXiv:1411.4028 [quant-ph].
8. Peruzzo A., McClean J., et al. A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5. – Art. 4213.
9. Harrow A.W., Hassidim A., Lloyd S. Quantum algorithm for solving linear systems of equations // *Physical Review Letters*. – 2009. – Vol. 103, No. 15. – P. 150502.
10. Кирилюк М.А., Бочаров Н.А. Разработка программной модели квантовых вычислений и моделирование работы квантовых алгоритмов на платформе "Эльбрус" // Вестник Концерна ВКО "Алмаз – Антей". – 2022. – № 1. – С. 93-101.
11. Жулев В.И., Левушкин В.С., Неуен Т.Н. Планирование локальной траектории автомобиля-робота в реальном времени // Вестник РГРТУ. – 2013. – № 4. – Вып. 46. – С. 18-23.
12. Рейндогльд Э., Део Н. Комбинаторные алгоритмы решения задачи коммивояжера. Теория и практика. – М.: Мир, 2000. – 480 с.
13. Ruan Yue, Xiling Xue, Yuanxia Shen. Quantum Image Processing: Opportunities and Challenges // *Mathematical Problem in Engineering*. – 2021. – <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2021/6671613/>.
14. Zhang, Yi, Kai Lu, and YingHui Gao. QSobel: a novel quantum image edge extraction algorithm // *Science China Information Sciences*. – 2015. – 58.1. – P. 1-13. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s11432-014-5158-9>.
15. Yao, Xi-Wei, et al. Quantum image processing and its application to edge detection: theory and experiment // *Physical Review X* 7.3. – 2017. – 031041. – <https://arxiv.org/abs/1801.01465>.
16. Katiyar Sunil Kumar, and Arun P.V. Comparative analysis of common edge detection techniques in context of object extraction // arXiv preprint. – 2014. – arXiv:1405.6132. – <https://arxiv.org/abs/1405.6132>.
17. Preskill J. Quantum Computing in the NISQ era and beyond // *Quantum*. – 2018. – Vol. 2. – P. 79.
18. Acharya R., Aleiner I., Allen R. M. et al. Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit // *Nature*. – 2023. – Vol. 614, No. 7949. – P. 676-681.
19. Bruzewicz C. D., Chiaverini J., McConnell R., Sage J. M. Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges // *Applied Physics Reviews*. – 2019. – Vol. 6, No. 2. – P. 021314.
20. Memon Q. A., Al Ahmad M., Pecht M. Quantum Computing: Navigating the Future of Computation, Challenges, and Technological Breakthroughs // *Quantum Reports*. – 2024. – Vol. 6, No. 4. – P. 627-663.

REFERENCES

1. Romanov A.M. Obzor apparatno-programmnogo obespecheniya sistem upravleniya robotov razlichnogo masshtaba i naznacheniya. Ch. 3. Ekstremal'naya robototekhnika [Review of hardware and software for robot control systems of various scales and purposes. Part 3. Extreme robotics], *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal], 2020, Vol. 8, No. 3 (35), pp. 14-32.
2. Bocharov N.A. Modelirovanie algoritmov katastrofoustoychivosti grupp robotov na programmno-apparatnoy platforme "El'brus" [Modeling Disaster Resistance Algorithms for Robot Groups on the Elbrus Hardware and Software Platform], *Radiopromyshlennost'* [Radio Industry], 2019, No. 3, pp. 8-14.
3. Sokolov O.A., Berber M.O. Perspektivy ispol'zovaniya kvantovykh komp'yutеров v kosmicheskoy aviatsii [Prospects for Using Quantum Computers in Space Aviation], *Nauchnyy lider* [Scientific Leader], 2023, No. 21 (119).
4. Mannone M., Seidita V., Chella A. Quantum computing for swarm robotics: a local-to-global approach, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2025, Vol. 383, Art. 20240139.
5. Doherty M. Quantum accelerators: a new trajectory of quantum computers, *Digitale Welt*, 2021, Vol. 5, No. 2, pp. 74-79.

6. Grover L.K. Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack, *Physical Review Letters*, 1997, Vol. 79, No. 2, pp. 325-328.
7. Farhi E., Goldstone J., Gutmann S. A quantum approximate optimization algorithm, *arXiv preprint*, 2014. arXiv:1411.4028 [quant-ph].
8. Peruzzo A., McClean J., et al. A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor, *Nature Communications*, 2014, Vol. 5, Art. 4213.
9. Harrow A.W., Hassidim A., Lloyd S. Quantum algorithm for solving linear systems of equations, *Physical Review Letters*, 2009, Vol. 103, No. 15, pp. 150502.
10. Kirilyuk M.A., Bocharov N.A. Razrabotka programmnoy modeli kvantovykh vychisleniy i modelirovanie raboty kvantovykh algoritmov na platforme "El'brus" [Development of a software model of quantum computing and modeling of quantum algorithms on the Elbrus platform], *Vestnik Kontserna VKO "Almaz – Antey"* [Bulletin of the Almaz-Antey Air and Space Defense Concern], 2022, No. 1, pp. 93-101.
11. Zhulev V.I., Levushkin V.S., Nguen T.N. Planirovanie lokal'noy traektorii avtomobilya-robota v real'nom vremeni [Planning a local trajectory of a robotic car in real time], *Vestnik RGRU* [Bulletin of the Russian State Radio Engineering University], 2013, No. 4, Issuep. 46, pp. 18-23.
12. Reyndog'l'd E., Deo N. Kombinatornye algoritmy resheniya zadachi kommvoyazhera. Teoriya i praktika [Combinatorial algorithms for solving the traveling salesman problem. Theory and practice]. Moscow: Mir, 2000, 480 p.
13. Ruan Yue, Xiling Xue, Yuanxia Shen. Quantum Image Processing: Opportunities and Challenges, *Mathematical Problem in Engineering*. 2021. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2021/6671613/>.
14. Zhang, Yi, Kai Lu, and Yinghui Gao. QSobel: a novel quantum image edge extraction algorithm, *Science China Information Sciences*, 2015, 58.1, pp. 1-13. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11432-014-5158-9>.
15. Yao, Xi-Wei, et al. Quantum image processing and its application to edge detection: theory and experiment, *Physical Review*, X 7.3, 2017, 031041. Available at: <https://arxiv.org/abs/1801.01465>.
16. Katiyar Sunil Kumar, and Arun P.V. Comparative analysis of common edge detection techniques in context of object extraction, *arXiv preprint*, 2014, arXiv:1405.6132. Available at: <https://arxiv.org/abs/1405.6132>.
17. Preskill J. Quantum Computing in the NISQ era and beyond, *Quantum*, 2018, Vol. 2, pp. 79.
18. Acharya R., Aleiner I., Allen R. M. et al. Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit, *Nature*, 2023, Vol. 614, No. 7949, pp. 676-681.
19. Bruzewicz C. D., Chiaverini J., McConnell R., Sage J. M. Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges, *Applied Physics Reviews*, 2019, Vol. 6, No. 2, pp. 021314.
20. Memon Q. A., Al Ahmad M., Pecht M. Quantum Computing: Navigating the Future of Computation, Challenges, and Technological Breakthroughs, *Quantum Reports*, 2024, Vol. 6, No. 4, pp. 627-663.

Бочаров Никита Алексеевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; г. Москва, Россия; тел.: +79167346437; д.т.н.; зам. руководителя управления – главный научный сотрудник.

Парамонов Николай Борисович – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: paramonov_n_b@rambler.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79166213432; д.т.н.; профессор; руководитель управления – главный научный сотрудник.

Bocharov Nikita Alexeevich – JSC «INEUM»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; Moscow, Russia; phone: +79167346437; dr. of eng. sc.; deputy chief of department – chief scientific officer.

Paramonov Nikolay Borisovich – JSC «INEUM»; e-mail: paramonov_n_b@rambler.ru; Moscow, Russia; phone: +79166213432; dr. of eng. sc.; professor; chief of department – chief scientific officer.

П.Г. Букина, А.А. Меринов, С.С. Харченко, Е.Ю. Костюченко

РАСПОЗНАВАНИЕ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В РУССКОЯЗЫЧНОЙ РЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MFCC-ПРИЗНАКОВ И BLSTM-МОДЕЛИ ДЛЯ НАБОРА ДАННЫХ «DUSHA»

Рассматривается задача автоматического распознавания эмоциональных состояний по речевому сигналу с использованием современных методов глубокого обучения. Актуальность исследования обусловлена растущей потребностью в интеллектуальных системах, способных оценивать эмоциональное состояние человека. Такие технологии могут найти широкое применение в медицине, психологии, информационных системах и управлении персоналом. Основной целью работы является разработка эффективной нейросетевой модели для распознавания эмоций в русскоязычной речи с точностью, превосходящей показатели современных архитектур. В качестве основы для экспериментов использован открытый русскоязычный набор данных «Dusha», содержащий 300000 аудиозаписей, из которых для обучения взято 183055 аудиозаписей подвыборки «Crowd», размеченной по четырём эмоциональным категориям: радость, грусть, злость и нейтральное состояние. Для подачи речевых сигналов в нейронную сеть были получены мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC), которые демонстрируют высокую эффективность в задачах анализа и классификации речи, – 20 коэффициентов, извлеченные при использовании временного окна 20 мс и перекрытия 10 мс, с последующей нормализацией значений. Базовой архитектурой нейросетевой модели выступила двунаправленная рекуррентная сеть с долгой краткосрочной памятью (BLSTM), способная учитывать как прошлый, так и будущий контекст во временной последовательности. Для борьбы с переобучением и повышения обобщающей способности модель была модифицирована: в неё были добавлены свёрточные слои (CNN), слои MaxPooling для снижения размерности, а также механизмы Dropout и BatchNormalization. В результате предложенная гибридная CNN-BLSTM архитектура продемонстрировала точность 62,9% на тестовой выборке, что на 6,7% выше исходной модели (56,2%). Полученные результаты были сопоставлены с результатами современных архитектур, а именно MobileNetV2, HuBERT и WavLM. Анализ позволил обозначить перспективы дальнейшего повышения качества исследования за счет комплексной работы над структурой и параметрами используемой модели, а также балансировки классов и рассмотрения дополнительных акустических признаков.

Эмоции; набор данных; нейронная сеть; алгоритм; речевой сигнал; аудиозапись; классификация.

P.G. Bukina, A.A. Merinov, S.S. Kharchenko, E.Y. Kostyuchenko

RECOGNITION OF EMOTIONAL STATES IN RUSSIAN SPEECH USING MFCC FUNCTIONS AND THE BLSTM MODEL FOR THE DUSHA DATASET

This paper investigates the task of automatic emotion recognition from speech signals using contemporary deep learning techniques. The relevance of this study arises from the increasing demand for intelligent systems capable of assessing human emotional states, with potential applications in medicine, psychology, information systems, and personnel management. The primary objective is to develop an efficient neural network model for emotion recognition in Russian speech that outperforms existing state-of-the-art architectures. The experiments were conducted using the open-source Russian-language dataset Dusha, which contains 300,000 audio recordings. A total of 183,055 samples from the Crowd subset, annotated with four emotional categories—joy, sadness, anger, and neutral state—were used for training. Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs) were extracted as input features (20 coefficients with a 20 ms window and 10 ms overlap), followed by normalization. The baseline architecture employed a bidirectional long short-term memory network (BLSTM), capable of modeling both past and future temporal dependencies. To improve generalization and mitigate overfitting, the model was enhanced with convolutional layers (CNN), MaxPooling layers, and regularization mechanisms including Dropout and Batch Normalization. The resulting hybrid CNN-BLSTM architecture achieved 62.9% accuracy on the test set, exceeding the baseline performance (56.2%) by 6.7%. The results were further compared with state-of-the-art architectures such as MobileNetV2, HuBERT, and WavLM. The analysis highlights future directions for improving model performance through structural optimization, class balancing, and incorporation of additional acoustic features.

Emotion recognition; dataset; neural networks; algorithm; speech signal; audio recording; classification.

Введение. Современные технологии обработки аудиоданных дают возможность автоматически определять психоэмоциональное состояние человека. Анализ речевых сигналов как способ определения психоэмоционального состояния является важным направлением в развитии систем искусственного интеллекта [1]. Эмоции отражаются в акустических характеристиках речи, связанных с физиологическим и когнитивным состоянием человека, что позволяет использовать голос как индикатор внутреннего состояния [2]. Такие технологии находят применение в медицине, психологии, информационных системах и управлении персоналом. Например, в корпоративной среде отслеживание эмоционального состояния сотрудников может способствовать повышению продуктивности и снижению уровня истощения при решении профессиональных задач на работе [3].

Исследуя зависимость между речью и стрессом в 1988 году Национальный институт истины США разработал систему CVSA (Computer Voice Stress Analyzer), способную анализировать уровень стресса по голосу с целью выявления лжи, что нашло широкое применение в правоохранительной практике [4]. Также в настоящее время системы распознавания эмоций активно внедряются в службы клиентской поддержки и колл-центры для оценки качества взаимодействия и автоматического выявления конфликтных ситуаций [5].

Реализация системы распознавания эмоций требует двух этапов: формирования репрезентативного набора данных и выбора модели классификации. Современные исследования опираются на аудиоданные с эмоционально окрашенной речью, однако существует дисбаланс в распределении по языкам – англоязычные наборы данных преобладают, тогда как для других языков, включая русский, наблюдается заметный дефицит [6]. На этапе проектирования исследователи сталкиваются с необходимостью выбора набора эмоций. При выборе набора часто используется модель с 6 базовыми эмоциями, предложенная Полом Экманом: радость, гнев, грусть, страх, удивление и отвращение [7]. При этом если опираться на более широкую профессиональную практику, то поздние работы, в частности исследование Калифорнийского университета в Беркли, демонстрируют существование 27 базовых эмоций и их непрерывный переход друг в друга [8].

Другой распространённый подход к классификации – использование двумерного пространства «валентность–возбуждение». Возбуждение коррелирует с физиологическими параметрами, такими как сердечный ритм и кровяное давление, что отражается в речевой динамике: радость и гнев проявляются через энергичную речь, а грусть через медленную и монотонную. При этом валентность является характеристикой положительной или отрицательной окраски эмоций, которая не имеет однозначной речевой корреляции. Исследование Йоханнеса Вагнера указывает на эффективность использования трансформеров для извлечения скрытой лингвистической информации, улучшающей классификацию по шкале валентности [9].

Также при исследовании эмоций данных ключевым аспектом остаётся степень естественности речи в аудиоданных [10]. Выделяют три уровня: естественная (в реальных ситуациях), полустественная (в кино, постановках), и искусственная (дикторская речь с заданными фразами). Первые редко используются из-за этических ограничений, третьи страдают недостаточной реалистичностью эмоций. Оптимальный компромисс предлагают полустественные данные. Также необходимо учитывать параметры говорящего: пол, возраст и язык. Половые и возрастные различия в экспрессии эмоций требуют сбалансированных выборок для обеспечения универсальности модели.

В данной работе ставится задача разработки эффективной модели автоматического распознавания эмоций в русскоязычной речи. Актуальность модели обусловлена малым количеством решений, адаптированных под русский язык. Большинство современных нейросетевых моделей обучаются и тестируются на англоязычных наборах данных, что ограничивает их применимость в русскоязычной среде. Следовательно, существует необходимость в создании специализированной модели, учитывающей особенности русскоязычной речи и не уступающей по точности имеющимся архитектурам.

1. Исследование наборов данных. Набор данных «Dusha» является открытым русскоязычным набором, он состоит из 300000 аудиозаписей в формате «WAV», сопровождаемых транскрипциями, и предназначен для задач распознавания эмоций по речевым признакам [11]. Набор состоит из двух групп: Crowd и Podcast. Первая группа представ-

ляет озвученные актерами сгенерированные тексты на базе разговоров людей с виртуальными ассистентами. Вторая группа содержит маленькие выжимки из подкастов, классифицированные по эмоциям. В данном наборе присутствует четыре класса эмоций: печаль, гнев, счастье и нейтральность.

В табл. 1 представлены русскоязычные наборы данных и сравнительные характеристики. Преимуществами набора данных «Dusha» перед другими русскоязычными наборами данных являются внушительный размер, большое количество задействованных говорящих, доступность, актуальность и современность. Для наборов данных «Ruslana» [12] и «RESD» [13] ограничен доступ.

Таблица 1

Русскоязычные наборы данных

Название	Объем	Количество говорящих	Метод создания	Количество эмоций
Dusha	300000 записей	Более 2000	Чтение реплик, подкасты	4
Ruslana	3660 записей	61	Чтение предложений	5
RESD	Более 3000 записей	200	Чтение диалогов	7

В дальнейшем исследовании используется обучающая часть «Crowd» набора данных «Dusha», содержащая 183055 аудиозаписей, поскольку часть с подкастами недоступна по причине авторского права. В табл. 2 представлено количество аудиозаписей в обучающем наборе для каждой эмоции.

Таблица 2

Содержание обучающего набора

Наименование эмоции	Количество аудиофайлов	Длительность, час
Радость	22007	29
Грусть	56378	73
Злость	29798	39
Нейтральность	74872	88

Для получения входных данных было решено использовать алгоритм вычисления мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC).

2. Извлечение входных признаков. В качестве входных признаков для нейронной сети были выбраны мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC). Они представляют вектор из определенного количества вещественных чисел, отражающий энергию спектра речевого сигнала. Данный признак учитывает волновую природу сигнала и выделяет наиболее существенные частоты, воспринимаемые человеком. MFCC устойчивы к шуму, а также они широко используются в распознавании речи [14–16].

Процесс извлечения мел-частотных кепстральных коэффициентов представлен на рис. 1 и включает несколько этапов. Аудиосигнал разбивается на короткие перекрывающиеся кадры с применением оконной функции. После чего для каждого кадра вычисляется спектр мощности при помощи быстрого преобразования Фурье. Полученная энергия спектра пропускается через банк треугольных мел-фильтров, имитирующих нелинейное восприятие частот человеческим ухом. Далее применяются логарифмирование для усиления низкоамплитудных компонентов и дискретное косинусное преобразование (DCT) для сжатия информации в вектор коэффициентов.

Для извлечения MFCC из аудиофайла использовалась библиотека «Librosa» [17]. Она содержит функцию «mfcc», позволяющую вычислять заданное количество MFCC. При помощи данной функции были получены 20 признаков с размером окна 20 мс и перекрытием 10 мс. Полученные массивы коэффициентов были нормализованы, в результате чего все значения были приведены к диапазону от 0 до 1.



Рис. 1. Алгоритм извлечения MFCC из аудиосигнала

3. Разработка архитектуры нейронной сети. В задаче распознавания эмоций по речевому сигналу зачастую отдают предпочтение искусственному интеллекту. В основном исследователи используют сверточную или рекуррентную архитектуры нейронной сети. В данной работе отдано предпочтение рекуррентной нейронной сети (RNN) на основе длительной кратковременной памяти (LSTM), так как она имеет преимущество в связи с возможностью извлечения эволюции долгосрочных временных рядов за счет памяти [18]. Сверточные нейронные сети (CNN) предназначены для решения задач распознавания объектов, однако имеют место в распознавании эмоций в речи, поскольку они быстрее обучаются и содержат меньшее число параметров для оптимизации.

Первоначально реализованная архитектура имеет четыре двунаправленных слоя (рис. 2). Основная идея двунаправленного слоя заключается в учете нейронной сетью прошлого и будущего контекста для каждой точки во входной последовательности за счет подачи сигнала как вперед, так и назад во времени. Первый двунаправленный LSTM-слой имеет по 256 скрытых нейронов в прямом и обратном направлении, второй – 128 нейронов, в третьем слое количество нейронов уменьшено до 64. Четвертый слой содержит также 64 скрытых нейрона на каждое направление, однако возвращает только последний временной шаг выходной последовательности, когда предыдущие слои возвращают выход для каждого временного шага последовательности. Выходной слой имеет 4 нейрона, соответствующих количеству классов. Поскольку рассматривается многоклассовая классификация, в качестве функции активации выбрана функция «softmax».



Рис. 2. Архитектура исходной модели

Представленная на рис. 2 модель нейронной сети обучалась на 50 эпохах и показывала стабильные результаты.

Графики точности (рис. 3) и функции потерь (рис. 4) исходной модели при обучении свидетельствуют о том, что модель переобучается, так как доля верных ответов на валидационной выборке значительно ниже доли верных ответов на обучающей выборке и стабилизируется на данном уровне (около 0,56), не достигая точности обучающей выборки.

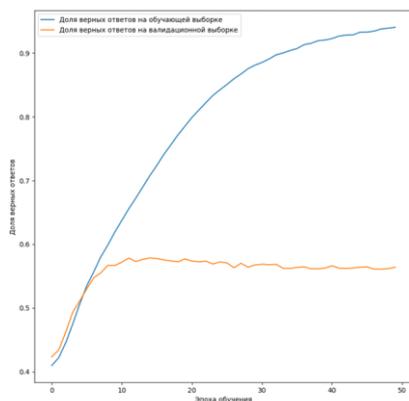


Рис. 3. График точности исходной модели

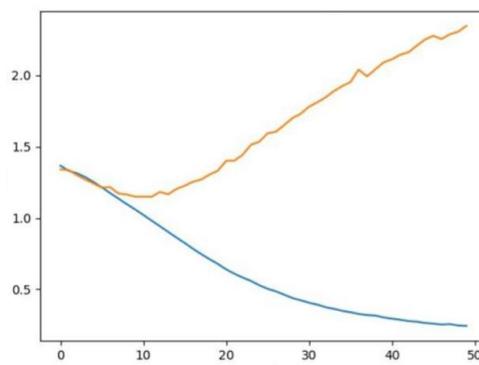


Рис. 4. График функции потерь исходной модели

На основе полученных результатов было принято решение избежать переобучение за счет изменения архитектуры модели, сама архитектура модели была изменена при помощи эмпирического метода тестирования, который включал в себя постепенное изменение параметров и структуры (рис. 5).

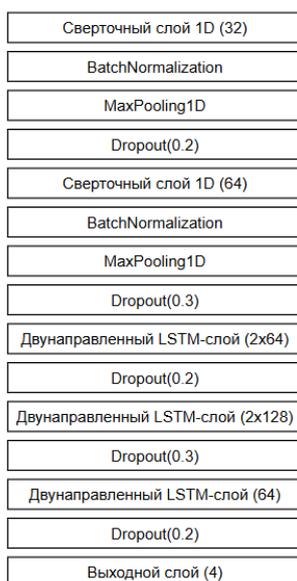


Рис. 5. Архитектура итоговой модели

В результате в итоговой модели сокращено количество нейронов и двунаправленных LSTM-слоев по причине малой скорости обучения и высокого риска переобучения за счет большого количества параметров. Также итоговая модель содержит сверточные слои, поскольку они применяют фильтры, способные вычлнять локальные признаки внутри временных окон, например, резкие изменения частоты, связанные с определенными эмоциональными состояниями. Использование слоев MaxPooling позволяет сокра-

тить размерность данных, тем самым улучшив обобщающую способность модели при помощи выделения наиболее значимых признаков и сокращения несущественной информации. Для борьбы с переобучением были добавлены слои Dropout, которые во время обучения «отключают» определенную долю нейронов на каждой итерации, что позволяет избежать сильной зависимости между нейронами. Слои BatchNormalization позволяют ускорить настройку модели за счет нормализации не только входных признаков, но и активаций промежуточного слоя.

4. Обучение разработанной модели. Обучающий набор Crowd был разбит на три части: 70% взято на обучение модели, 20% – на валидацию, 10% – на тестирование. После многочисленных прогонов было выявлено оптимальное количество эпох, необходимых модели для обучения, а именно 300. Также для модели были автоматически настроены веса для классов, чтобы минимизировать влияние несбалансированности набора. В табл. 3 представлены результаты обучения исходной модели и итоговой. В качестве функции потерь (loss) использовалась категориальная кросс-энтропия.

Таблица 3

Результаты обучения на валидационном наборе

Модель	Аккараци, %	F1-Score, %	Loss
Исходная	56,39	56,2	2,3082
Итоговая	63,41	63,68	0,8923

График точности (рис. 6) модели на обучающем и валидационном наборах отражает способность модели к обучению, в отличие от первоначальной архитектуры.

Также функция потерь итоговой модели стремится к нулю в процессе обучения, что свидетельствует об отсутствии переобучения (рис. 7).

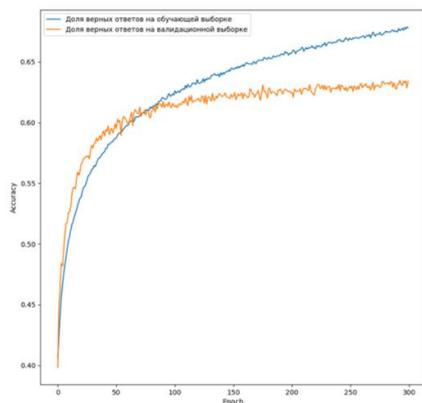


Рис. 6. График точности итоговой модели

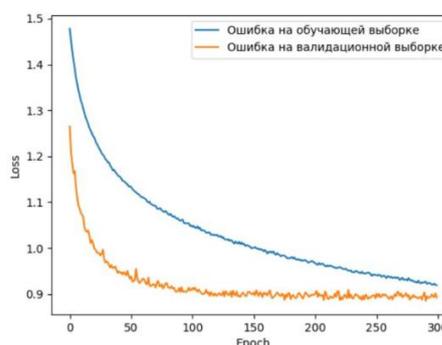


Рис. 7. График функции потерь итоговой модели

В результате изменения архитектуры и параметров модели удалось исключить переобучение и повысить точность на валидационной выборке.

5. Тестирование разработанных моделей. В табл. 4 представлено количество аудиофайлов для каждой эмоции в тестовом наборе данных.

Таблица 4

Содержание тестового набора

Наименование эмоции	Количество аудиофайлов
Злость	2404
Грусть	4459
Нейтральность	6036
Радость	1746

В табл. 5 представлены полученные метрики оценки качества исходной и итоговой моделей на тестовых данных.

Таблица 5

Результаты тестирования созданных моделей

Модель	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
Исходная	0,562	0,573	0,563	0,570
Итоговая	0,629	0,636	0,629	0,631

В результате тестирования итоговая модель показала увеличение значений метрик качества на 6-7% в сравнении с исходной моделью.

Полученные в результате тестирования метрики точности разработанных моделей были сравнены с результатами, представленными в статьях [19, 20]. В первой статье используется архитектура, основанная на MobileNetV2, которая в качестве входных данных принимает мел-частотные признаки. Во второй статье набор данных тестируется на моделях HuBERT и WavLM, которые используются в задачах обработки разговорной речи и учитывают контекст.

Поскольку в статьях используется метрика accuracy, результаты тестирования разработанных моделей были сравнены по ней с результатами моделей, представленных в статьях (табл. 6). Также модели были сравнены с моделью на основе MobileNetV2 при помощи метрики f-меры (f1-score), т.к. набор данных является несбалансированным. По другим двум моделям оценка данной метрикой не проводилась.

Таблица 6

Сравнение результатов с современными моделями

Модель	F1-Score	Accuracy
Исходная модель	0,573	0,562
Итоговая модель	0,636	0,629
MobileNetV2	0,770	0,760
HuBERT	-	0,866
WavLM	-	0,872

Заключение. Экспериментально показано, что модифицированная модель на основе BLSTM с добавлением сверточных слоев обеспечивает улучшение точности классификации более чем на 6% по сравнению с исходной архитектурой, что подтверждает эффективность внесенных изменений. Полученные результаты рассмотрены в сравнении с современными архитектурами, такими как MobileNetV2, HuBERT и WavLM, что позволяет выделить возможности для дальнейшего повышения качества исследования путём оптимизации структуры и параметров модели.

Данная работа выполнялась в рамках Программы развития ТУСУР на 2025-2036 годы Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lian H., Lu C., Li S., Zhao Y. A Survey of deep learning-based multimodal emotion recognition: speech, text, and face // Entropy. – 2023. – No. 25 (10).
2. Богданова Д.Р., Акушев А.Т. Распознавание эмоций по речевому сигналу // E-Scio: электрон. научн. журн. – 2021. – № 6 (57).
3. Назарова Е.К. Влияние психики на производительность труда // Universum: психология и образование. – 2024. – № 7. – С. 53-56.
4. Горшков Ю.Г. Визуализация эмоциональной напряженности человека по речевому сигналу // Научная визуализация. – 2023. – № 2. – С. 102-112.
5. Никифоров А.А. Разработка модуля распознавания эмоций разговора колл-центра с использованием рекуррентных искусственных нейронных сетей, для выявления нежелательного контента // Вестник науки. – 2023. – № 7. – С. 226-231.
6. Малыгина Ю.П. Нейронные сети: особенности, тенденции, перспективы развития // Молодой исследователь Дона: электронный научный журнал. – 2018. – № 5 (14). – С. 79-82.

7. Ekman P., Oster H. Facial expressions of emotions // *Annual Review of Psychology*. – 1979. – No. 30. – P. 527-554.
8. Cowen A.S., Keltner D. Self-report captures 27 distinct categories of emotion bridged by continuous gradients // *Proceedings of the National Academy of Sciences, PNAS*. – 2017. – No. 114 (38). – P. E7900-E7909.
9. Wagner J., Triantafyllopoulos A., Wierstorf H., Schmitt M., Burkhardt F., Eyben F., Schuller B.W. Dawn of the transformer era in speech emotion recognition: closing the valence gap // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2023.
10. Ayadi M., Kamel M., Karray F. Survey on speech emotion recognition: Features, classification schemes, and databases // *Pattern Recognition*. – 2011. – No. 44. – P. 572-587.
11. Датасет для распознавания эмоций – Dusha. – Режим доступа: <https://developers.sber.ru/portal/products/dusha?ysclid=m7hrx3w5t3967089717>.
12. Makarova V., Petrushin V. Ruslana: a database of Russian emotional utterances // *7th International Conference on Spoken Language Processing*. – 2002. – P. 2041-2044.
13. Russian emotional speech dialogs (RESL). – Режим доступа: <https://www.kaggle.com/datasets/ar4ikov/resd-dataset>, свободный.
14. Sahidullah M., Saha G. Design, analysis and experimental evaluation of block based transformation in MFCC computation for speaker recognition // *Speech Communication*. – 2012. – Vol. 54, Issue 4. – P. 543-565.
15. Jagtap S., Desai K., Patil J. A Survey on Speech Emotion Recognition Using MFCC and Different Classifier. – 2022.
16. Badr Y., Mukherjee P., Thumati S. Speech Emotion Recognition using MFCC and Hybrid Neural Networks // *13th International Conference on Neural Computation Theory and Applications*. – 2021.
17. Librosa – librosa 0.10.2 documentation. – Режим доступа: <https://librosa.org/doc/latest/index.html>.
18. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // *Neural Computation*. – 1997. – No. 9 (8). – P. 1735-1780.
19. Kondratenko V., Sokolov A., Karpov N., Kutuzov O., Savushkin N., Minkin F. Large raw emotional dataset with aggregation mechanism // *ArXiv (Cornell University)*. – 2022.
20. Лемаев В.И., Лукашевич Н.В. Автоматическая классификация эмоций в речи: методы и данные // *Litera. Nota bene*. – 2024. – № 4. – С. 159-173.

REFERENCES

1. Lian H., Lu C., Li S., Zhao Y. A Survey of deep learning-based multimodal emotion recognition: speech, text, and face, *Entropy*, 2023, No. 25 (10).
2. Bogdanova D.R., Akushev A.T. Raspoznavanie emotsiy po rechevomu signalu [Emotion recognition based on speech signal], *E-Scio: elektron. nauchn. zhurn* [E-Scio: electronic scientific journal], 2021, No. 6 (57).
3. Nazarova E.K. Vliyaniye psikhiki na proizvoditel'nost' truda [Influence of the psyche on labor productivity], *Universum: psikhologiya i obrazovanie* [Universum: Psychology and Education], 2024, No. 7, pp. 53-56.
4. Gorshkov Yu.G. Vizualizatsiya emotsional'noy napryazhennosti cheloveka po rechevomu signalu [Visualization of human emotional tension based on speech signal], *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific Visualization], 2023, No. 2, pp. 102-112.
5. Nikiforov A.A. Razrabotka modulya raspoznavaniya emotsiy razgovora koll-tsentra s ispol'zovaniem rekurrentnykh iskusstvennykh neyronnykh setey, dlya vyavleniya nezhelatel'nogo kontenta [Development of a module for recognizing emotions in call center conversations using recurrent artificial neural networks to identify unwanted content], *Vestnik nauki* [Herald of Science], 2023, No. 7, pp. 226-231.
6. Malygina Yu.P. Neyronnye seti: osobennosti, tendentsii, perspektivy razvitiya [Neural networks: features, trends, prospects for development], *Molodoy issledovatel' Dona: elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Young researcher of the Don: electronic scientific journal], 2018, No. 5 (14), pp. 79-82.
7. Ekman P., Oster H. Facial expressions of emotions, *Annual Review of Psychology*, 1979, No. 30, pp. 527-554.
8. Cowen A.S., Keltner D. Self-report captures 27 distinct categories of emotion bridged by continuous gradients, *Proceedings of the National Academy of Sciences, PNAS*, 2017, No. 114 (38), pp. E7900-E7909.
9. Wagner J., Triantafyllopoulos A., Wierstorf H., Schmitt M., Burkhardt F., Eyben F., Schuller B.W. Dawn of the transformer era in speech emotion recognition: closing the valence gap, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2023.
10. Ayadi M., Kamel M., Karray F. Survey on speech emotion recognition: Features, classification schemes, and databases, *Pattern Recognition*, 2011, No. 44, pp. 572-587.
11. Dataset dlya raspoznavaniya emotsiy – Dusha [Dataset for emotion recognition – Dusha]. Available at: <https://developers.sber.ru/portal/products/dusha?ysclid=m7hrx3w5t3967089717>.

12. Makarova V., Petrushin V. Ruslana: a database of Russian emotional utterances, *7th International Conference on Spoken Language Processing*, 2002, pp. 2041-2044.
13. Russian emotional speech dialogs (RESL). Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/ar4ikov/resd-dataset>.
14. Sahidullah M., Saha G. Design, analysis and experimental evaluation of block based transformation in MFCC computation for speaker recognition, *Speech Communication*, 2012, Vol. 54, Issue 4, pp. 543-565.
15. Jagtap S., Desai K., Patil J. A Survey on Speech Emotion Recognition Using MFCC and Different Classifier, 2022.
16. Badr Y., Mukherjee P., Thumati S. Speech Emotion Recognition using MFCC and Hybrid Neural Networks, *13th International Conference on Neural Computation Theory and Applications*, 2021.
17. Librosa – librosa 0.10.2 documentation. – Режим доступа: <https://librosa.org/doc/latest/index.html>.
18. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory, *Neural Computation*, 1997, No. 9 (8), pp. 1735-1780.
19. Kondratenko V., Sokolov A., Karpov N., Kutuzov O., Savushkin N., Minkin F. Large raw emotional dataset with aggregation mechanism, *ArXiv (Cornell University)*, 2022.
20. Lemaev V.I., Lukashevich N.V. Avtomaticheskaya klassifikatsiya emotsiy v rechi: metody i dannye [Automatic classification of speech emotions: methods and data], *Litera. Nota bene*, 2024, No. 4, pp. 159-173.

Букина Полина Германовна – Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; e-mail: bukina.polina2014@gmail.com; г. Томск, Россия; кафедра безопасности информационных систем; студент.

Мерин Арсен Арзуманович – Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; e-mail: merinovarsen@mail.ru; г. Томск, Россия; кафедра безопасности информационных систем; студент.

Харченко Сергей Сергеевич – Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; e-mail: kss@fb.tusur.ru; г. Томск, Россия; кафедра безопасности информационных систем; к.т.н.; доцент.

Костюченко Евгений Юрьевич – Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; e-mail: key@keva.tusur.ru; г. Томск, Россия; кафедра безопасности информационных систем; к.т.н.; и.о. зав. кафедрой.

Bukina Polina Germanovna – Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; e-mail: bukina.polina2014@gmail.com; Tomsk, Russia; the Department of Information Security Systems; student.

Merinov Arsen Arzumanovich – Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; e-mail: merinovarsen@mail.ru; Tomsk, Russia; the Department of Information Security Systems; student.

Kharchenko Sergey Sergeevich – Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; e-mail: kss@fb.tusur.ru; Tomsk, Russia; the Department of Information Security Systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kostyuchenko Evgeny Yurievich – Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; e-mail: key@keva.tusur.ru; Tomsk, Russia; the Department of Information Security Systems; cand. of eng. sc.; acting head of department.

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-248-262

Ж.Х. Мохаммад

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ И ОЦЕНКИ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРСОНАЛИЗАЦИИ КОНТЕНТА

Данная статья посвящена разработке и апробации методики построения онтологического профиля, предназначенного для использования в системах персонализации контента. В работе детально описана модульная архитектура веб-системы персонализации, иллюстрирующая методы и алгоритмы обработки и анализа текста на каждом этапе, а также представлен пошаговый алгоритм создания онтологии. Методика включает первичную обработку данных: извлечение ключевых слов и словосочетаний, их иерархическую кластеризацию для выявления семантической

структуры предметной области. Далее следует этап определения пороговых значений для отсева малозначимых связей, извлечения и формализации взаимосвязей между концептами с использованием методов обработки естественного языка, таких, как разрешение лексической неоднозначности и извлечение связей на основе семантического сходства. Для реализации этого процесса был разработан интегрированный конвейер (pipeline), объединяющий усовершенствованные алгоритмы, предложенные автором в предыдущих исследованиях, а именно: алгоритм извлечения ключевых фраз из отдельного текста на основе семантического сходства и модифицированный алгоритм разрешения лексической многозначности слов. В рамках данного конвейера также были оптимально интегрированы все необходимые инструменты обработки естественного языка, обеспечивающие эффективную работу указанных методов в процессе автоматического построения онтологии из текста. Особое внимание в исследовании уделяется комплексной оценке полученной онтологии с использованием специализированного набора критериев, позволяющих объективно оценить качество, полноту и непротиворечивость построенного профиля. Важной частью работы является проведение вычислительного эксперимента, который наглядно демонстрирует влияние каждого из этапов обработки данных на итоговое качество и эффективность онтологии. Показано, что предложенная методика позволяет построить практичную, масштабируемую и релевантную онтологию, готовую к промышленному внедрению и интеграции в системы персонализации для повышения их точности и адаптивности.

Онтологический профиль; персонализация контента; извлечение ключевых слов; иерархическая кластеризация; оценка онтологий; семантическая модель.

J.H. Mohammad

METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING AND EVALUATING AN ONTOLOGICAL PROFILE FOR CONTENT PERSONALIZATION SYSTEMS: STAGES AND EVALUATION CRITERIA

This article presents the development and testing of a methodology for building an ontological profile designed for content personalization systems. It details the modular architecture of a web-based personalization system, illustrating the text processing and analysis methods and algorithms employed at each stage, and provides a step-by-step procedure for ontology creation. The methodology encompasses primary data processing, including the extraction of keywords and phrases, followed by their hierarchical clustering to reveal the semantic structure of the domain. Subsequent stages involve defining thresholds to filter out insignificant connections, and extracting and formalizing relationships between concepts using natural language processing techniques such as word-sense disambiguation and semantic similarity-based relationship extraction. An integrated pipeline was developed to implement this process, combining improved algorithms proposed by the author in previous studies, namely, an algorithm for extracting key phrases from individual text based on semantic similarity and a modified algorithm for word sense disambiguation. This pipeline also optimally integrated all necessary natural language processing tools, ensuring the efficient operation of these methods in the process of automatically constructing an ontology from text. The study places particular emphasis on a comprehensive evaluation of the resulting ontology using a specialized set of criteria designed to objectively assess the profile's quality, completeness, and consistency. A important component of the work is a computational experiment that clearly demonstrates the impact of each data processing stage on the final quality and efficacy of the ontology. The results show that the proposed method enables the construction of a practical, scalable, and relevant ontology, suitable for industrial deployment and integration into personalization systems to enhance their accuracy and adaptability.

Ontology profile; content personalization; keyword extraction; hierarchical clustering; ontology evaluation; semantic model.

Введение. В условиях стремительного развития технологий искусственного интеллекта (ИИ), экспоненциального роста объёмов данных и распространения цифровых сервисов (социальные сети, Интернет вещей, большие данные, облачные вычисления) адаптация информации под индивидуальные потребности пользователей приобретает ключевое значение. Пользователи сталкиваются с серьёзными трудностями при поиске релевантной информации, что обусловлено беспрецедентным ростом объёмов доступного контента и его крайним разнообразием по форматам и источникам. Эта ситуация приводит к феномену информационной перегрузки, под которой понимается состояние, когда пользователь подвергается воздействию чрезмерного количества данных, значительная часть которых не соответствует его актуальным потребностям и интересам [1, 2], а также разнообразия форматов и источников информации. Эти факторы приводят к существенному снижению эф-

фективности информационного поиска и росту когнитивной нагрузки, которая необходима для фильтрации нерелевантного контента, навигации в условиях информационного шума и принятия решений в условиях семантической неоднозначности.

Указанные обстоятельства актуализируют необходимость разработки более совершенных технологий фильтрации и персонализации контента. Это подчеркивает важность Веб-Инженерии, которая направлена на создание веб-систем, соответствующих потребностям пользователей [3, 4]. Персонализация является одним из приложений Веб-Инженерии, включающим набор информационных процессов, направленных на обеспечение персонализированного поиска для каждого пользователя с учётом его предпочтений, поведения и других соответствующих данных [5–8]. Она включает динамическую адаптацию веб-контента, рекомендаций и пользовательских интерфейсов для соответствия конкретным потребностям и интересам каждого пользователя.

Основным ключом для персонализации веб-контента является создание профиля пользователя, который включает сбор и анализ данных об отдельных пользователях для понимания их предпочтений, интересов и поведения [8–11]. Современные подходы к построению пользовательских профилей опираются на две парадигмы: методы на основе концептов и методы на основе онтологических моделей. Методы на основе концептов, в основном, заключаются в извлечении ключевых слов или фраз из пользовательских данных, анализе их частоты и определении значимых терминов [12]. Несмотря на простоту и вычислительную эффективность, эти методы ограничены в своей способности учитывать базовую семантику текстового контента. Они рассматривают слова как изолированные единицы и игнорируют контекстные связи между ними. Это ограничение становится особенно проблематичным в случаях *неоднозначности* на уровне предметной области, когда один и тот же термин может иметь разные интерпретации в разных областях. Например, термин «cell» (клетка) может относиться к биологической клетке в медицинском контексте или к мобильному телефону в контексте телекоммуникаций. Это приводит к созданию профилей, перегруженных шумом и двусмысленностью, что повышает частоту ошибок алгоритмов функционирования систем персонализации.

Для устранения ограничений, связанных с использованием только ключевых слов, в некоторых работах применяются внешние источники данных, такие, как проект открытого каталога (англ. Open Directory Project, ODP). ODP предоставляет собой обширную иерархическую структуру категорий веб-сайтов, которая служит основой для создания онтологий и классификации контента. ODP используется для сопоставления терминов со значимыми концептами. Например, в [13–16], пользовательские интересы извлекаются из веб-документов и представляются в виде взвешенных категорий из ODP. Эти методы являются шагом к подходам, основанным на онтологиях, но им не хватает семантических связей между концептами.

Методы онтологического подхода, напротив, используют формальные онтологии для построения пользовательских профилей и структурируют интересы пользователей в виде онтологических концептов, используя формальные семантические отношения, например, связывая «глубокое обучение» с «искусственным интеллектом». Однако такие методы часто опираются на статические, предопределённые онтологии, которые не способны адаптироваться к динамичному характеру предпочтений пользователей или новым предметным областям. В [14] пользовательские профили создаются на основе URL-адресов и сопоставляются с категориями из онтологий *OpenDNS* и *DBpedia* [17, 18]. Это обогащает пользовательские профили семантическими связями, но может не обеспечивать точности в захвате конкретных интересов.

Соответственно, методы, основанные на концептах, делают акцент на простоту, но им не хватает семантической глубины, в то время как методы, использующие онтологический подход, предлагают более богатую семантику за счет вычислительной эффективности и адаптивности к изменяющемуся поведению пользователей или новым предметным областям. В результате, существующие методы по-прежнему недостаточно эффективны для обработки текстовых данных и извлечения знаний, что не позволяет достичь необходимого уровня эффективности систем веб-персонализации и делает их неспособными снизить когнитивную нагрузку на пользователя.

Для выявления указанных ограничений в данной статье представлен аналитический обзор методов построения профилей пользователей в веб-системах персонализации. Особое внимание уделяется технологиям обработки текстовых данных для задач адаптации контента, с подробным описанием применяемых методов на каждом этапе. В качестве практического вклада исследования была разработана программная реализация методики автоматического построения онтологии из текста с использованием технологий обработки естественного языка. Это включает извлечение ключевых фраз, разрешение лексической многозначности и выявление семантических связей на основе оценки контекстуального сходства. Для реализации данной методики был создан комплексный конвейер обработки данных (pipeline), интегрирующий усовершенствованные алгоритмы, предложенные авторами в предыдущих работах, с признанными инструментами текстовой аналитики.

1. Этапы персонализации контента веб-сайтов. Процесс персонализации веб-контента включает в себя ряд шагов, которые позволяют предоставлять пользователям индивидуализированные впечатления на основе их предпочтений и поведения [19]. На рис. 1 представлена последовательность этапов процесса в системе персонализации веб-контента на основе методов искусственного интеллекта и машинного обучения, которые подробно описаны ниже.

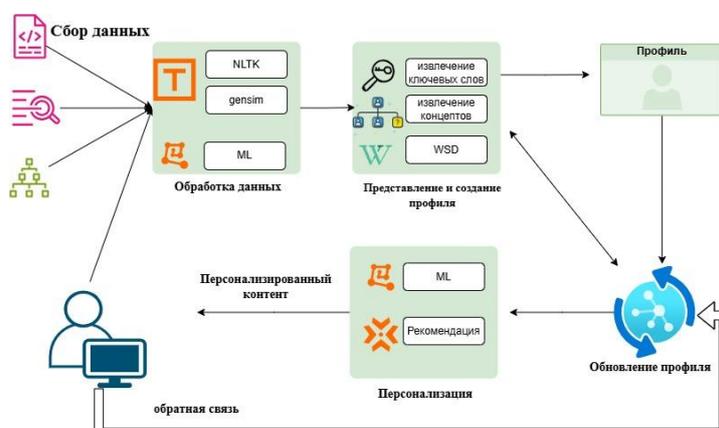


Рис. 1. Архитектура системы персонализации веб-контента

1.1. Сбор данных. Первый этап включает в себя сбор необходимых данных о пользователе. Это может включать как явные данные, предоставленные пользователем при регистрации или в ходе опросов, так и неявные данные, собранные в результате взаимодействия пользователя с веб-сайтом или приложением. Неявные данные могут включать историю просмотров, поисковые запросы, клики, историю покупок и активность в социальных сетях [8, 20].

1.2. Обработка данных: после сбора данные должны пройти обработку для удаления шума, заполнения отсутствующих значений и приведения в необходимый формат для анализа. Этот этап включает такие процессы, как очистка данных, нормализация и создание признаков. Для этого используются инструменты NLP:

- ◆ NLTK [21]: Библиотека Python для токенизации, стемминга, лемматизации и синтаксического анализа;
- ◆ WordNet [22]: Лексическая база для поиска синонимов, лемматизации и разрешения неоднозначностей;
- ◆ - SpaCy: это эффективная библиотека для обработки естественного языка (NLP) на Python [23].

1.3. Представление и создание профиля. Персонализация контента в современных системах основывается на построении профиля пользователя, который отражает его информационные потребности и предпочтения [24]. Эффективность рекомендаций напрямую зависит от способа представления этого профиля. Наиболее распространенным методом является

векторная модель, где интересы пользователя описываются взвешенными векторами ключевых слов или концептов, извлеченных из просмотренных документов. Этот подход отличается простотой реализации и вычислительной эффективностью, но сталкивается с проблемами полисемии и синонимии, что может снижать точность рекомендаций [25–27].

Для преодоления ограничений векторной модели применяются семантические сети, отображающие концепты и связи между ними. Этот подход, требующий сопоставления слов концептам через онтологии или машинное обучение, эффективно решает проблемы многозначности и синонимии, несмотря на сложность реализации. Альтернативой выступает иерархическая модель, организующая интересы пользователя в виде древовидной структуры, однако её гибкость ограничена зависимостью от чёткой иерархии.

Более совершенным решением является граф знаний, интегрирующий преимущества семантических сетей и иерархических моделей. Простые графы (без атрибутов) подходят для анализа топологии данных, например, в социальных сетях. Расширенные графы (с атрибутами) включают метаданные для точного описания сущностей и широко используются в рекомендательных системах и медицинских базах знаний, обеспечивая глубокий контекстный анализ. Недостатком является высокая ресурсоёмкость построения таких графов и зависимость от качества алгоритмов обработки данных.

В данной работе профиль пользователя строится на основе онтологической модели (онтологии) с использованием структуры графа знаний для хранения концептов, ключевых фраз и атрибутов данных. Онтология представляет собой формальную, явную спецификацию разделяемой концептуализации [28], определяющую классы, свойства, отношения и ограничения в рамках конкретной предметной области. В отличие от этого, граф знаний является практической реализацией, формирующей сеть реальных сущностей (узлов), связанных между собой отношениями (рёбрами). Известные примеры включают Google Knowledge Graph и Wikidata [17].

Основные операции, выполняемые на этом этапе, заключаются в анализе содержания описаний объектов, с которыми взаимодействовал пользователь, для выявления основных характеристик его предпочтений. Этот аналитический процесс использует ряд алгоритмов обработки естественного языка (NLP), включая извлечение ключевых фраз, идентификацию концептов и связывание ключевых фраз и концептов на более высоком уровне абстракции. Кроме того, процесс включает в себя выявление взаимосвязей между ключевыми словами и применение методов устранения неоднозначности слов для точного определения контекста интересов пользователя.

Предложено решение, предлагающее автоматически извлекать концепты и отношения из текста с помощью алгоритмов обработки и анализа текстов на естественном языке.

Для реализации конвейера разработки онтологии из текста в данной работе применяются алгоритмы, созданные автором ранее. В их число входят:

1. **Метод FBKE** [29, 31, 33] (Frequency and Bert-based Keyword Extraction) для извлечения ключевых фраз, использующий векторы встраивания на основе контекста для представления ключевых фраз, что позволяет вычислить значения сходства фразы с контекстом документа. FBKE включает два этапа: на первом выбираются кандидаты n -грамм на основе их частоты встречаемости в тексте документа; на втором этапе кандидаты, после присвоения им веса, ранжируются в соответствии с их близостью к контексту документа.

2. **Алгоритм Lesk-S-BERT** [34, 35] для устранения неоднозначности смыслов извлеченных слов (униграмм). **Lesk-S-BERT** использует векторы S-BERT вместо встраивания слов и дополняет аннотацию синсетов из WordNet примерами. Использование расширенной аннотации синсетов повышает точность определения правильного значения слова, поскольку эти примеры отражают контекстуальное использование слова, что является ключевым для понимания его значения в конкретном контексте. Использование S-BERT как при извлечении ключевых фраз, так и при устранении неоднозначности слов снижает вычислительные затраты алгоритма. Также, это гарантирует, что процесс устранения неоднозначности слов основан на том же контекстуальном понимании, которое использовалось для извлечения ключевых фраз, что приводит к более точной интерпретации интересов пользователя. Разработанные модифицированные метод и алгоритм интегрированы в создание и расширение пользовательского профиля с целью улучшения процесса персонализации веб-контента.

3. **Алгоритм извлечения семантических отношений** (его описание представлено в разделе, посвященном разработке и вычислительному эксперименту).

1.4. Обновление профиля. Профили пользователей не являются статическими и должны постоянно обновляться, чтобы отражать изменения в предпочтениях и поведении пользователя. Этот этап включает мониторинг взаимодействия пользователя, сбор новых данных и соответствующее обновление профиля. Для этого, используются те же методы и техники, которые применялись на этапе сбора данных и построения профиля пользователя. Это включает в себя анализ и обработку описаний объектов, извлечение ключевых фраз, которые характеризуют эти объекты, и устранения их неоднозначности.

1.5. Персонализация. Последний этап – использование профиля пользователя для персонализации веб-контента или рекомендаций. На этом этапе используется комбинация техник для генерации рекомендаций, адаптированных к потребностям пользователя на основе полученной из анализа профиля информации. Эти техники включают методы оценки близости или семантической схожести, которые оценивают актуальность новых объектов в отношении пользователя. Кроме того, применяются алгоритмы машинного обучения для разработки автоматизированных моделей персонализации, способных выявлять скрытые паттерны как из данных пользователя, так и из данных других пользователей. Анализируя эти паттерны, система может предоставлять рекомендации, которые соответствуют предпочтениям и требованиям пользователя.

В следующем разделе описывается методика построения онтологии из текста (онтологического профиля) с использованием набора инструментов обработки и анализа текстов на естественном языке.

2. Реализация методики построения онтологии из текста. Для построения онтологии применяются разработанные в предыдущих работах автора алгоритмы обработки и анализа текстов на естественном языке, в т.ч. модифицированный метод извлечения ключевых фраз, алгоритм устранения неоднозначности смысла слов и алгоритм построения профиля пользователя. Полный процесс реализации алгоритма построения онтологии описан ниже. На рис. 2 и 3 представлен пользовательский интерфейс для построения и оценки онтологий, который позволяет выбрать подходящие методы и функции для выполнения каждого из описанных этапов.

The screenshot shows a web application interface for ontology construction and evaluation. It is organized into four main sections, each with its own settings and controls:

- Загрузка документов (Document Upload):** Includes a file upload area with instructions to drag files or click for upload. Supported formats are TXT, PDF, DOCX. The language is set to Russian.
- Извлечение ключевых фраз (Keyphrase Extraction):** Method: YAKE (Unsupervised). N-gram range: Unigrams, Bigrams and Trigrams. Maximum number of phrases: 100.
- Word Sense Disambiguation:** Method: Алгоритм Lesk. Confidence threshold: 0.7.
- Векторизация и кластеризация (Vectorization and Clustering):** Method: BERT Embeddings. Clustering threshold (similarity): 0.6. Minimum cluster size: 3 phrases. Maximum number of topics: 20.

At the bottom, there is a large blue button labeled "Построить онтологию" (Build Ontology).

Рис. 2. Интерфейс приложения для построения и оценки онтологий

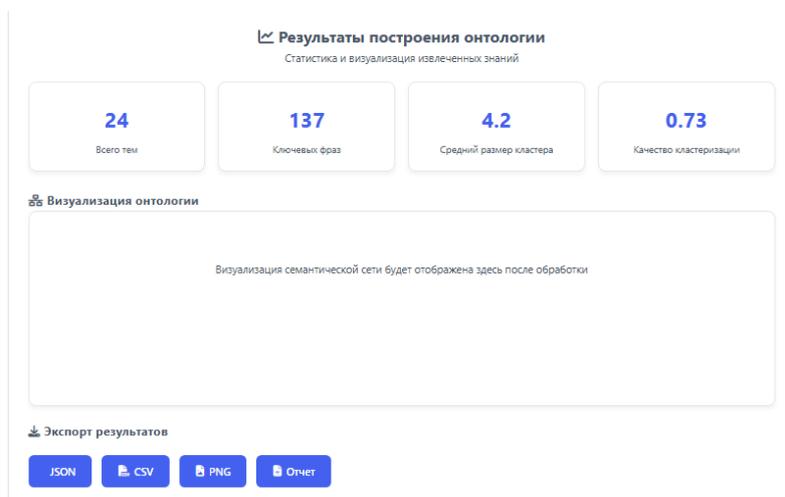


Рис. 3. Интерфейс приложения для построения и оценки онтологии

Приложение было разработано с использованием HTML, JavaScript и CSS для интерфейса, в то время как серверная часть была реализована на Python с использованием библиотеки Streamlit.

Процесс начинается с этапа предварительной обработки текстовых документов, которые представляют собой результаты поиска или любой другой текст, введенный пользователем для последующей обработки и преобразования в онтологию. Для извлечения ключевых фраз можно выбрать любой метод, например, Yake, Rake, TF-IDF, keyBERT или FBKE. В текущем эксперименте для извлечения ключевых фраз используется разработанный автором метод FBKE, который использует S-BERT для векторного представления предложений и возвращает для каждого документа список ключевых фраз вместе с их векторами. Данный этап может быть расширен за счет проведения семантического анализа с использованием библиотек типа SpaCy или других. Чем качественнее извлеченные ключевые фразы, тем лучше получается онтология, что и подтвердится при сравнении KeyBERT с нашим методом.

Интерфейс позволяет выбрать подходящий алгоритм устранения неоднозначности смысла слов с указанием порога уверенности алгоритма. В данной реализации был выбран модифицированный алгоритм LESK-BERT, предложенный автором в [30], для определения подходящих синсетов (наборов синонимов) для слов-униграмм и корректировки их векторных представлений в соответствии с их значениями для приближения к контексту, в котором они используются.

Для формирования тем и подтем применяется агломеративная кластеризация со следующими параметрами:

- ◆ Метрика расстояния: косинусное расстояние.
- ◆ Метод связи: *average linkage*, где расстояние между двумя кластерами вычисляется как среднее арифметическое расстояний между всеми парами объектов в этих кластерах.

При этом интерфейс позволяет управлять следующими параметрами:

- ◆ Максимальное количество тем.
- ◆ Пороговое расстояние (порог кластеризация): `distance_threshold = 0.4`.
- ◆ Минимальный размер кластера: `min_cluster_size = 3`.

Для создания профиля пользователя применяется иерархический алгоритм кластеризации векторов ключевых фраз для построения пользовательского профиля. Это позволяет выявить тематические интересы пользователя, где каждый кластер соответствует определенной теме. Алгоритм осуществляет многоуровневое разделение фраз на кластеры и подкластеры на основе вычисления семантической близости между векторными представлениями.

Критически важным параметром является порог сходства, определяющий объединение фраз в единую тему. На рис. 4 представлен механизм создания тем интересов с использованием алгоритма иерархической кластеризации. Экспериментальным путем установлено, что оптимальное значение данного порога составляет 60-70%.

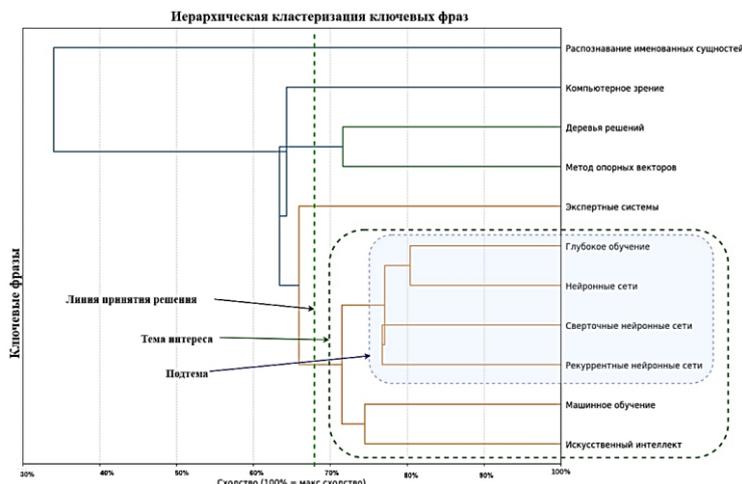


Рис. 4. Создание тем интересов с использованием иерархической кластеризации ключевых фраз

Как показано на диаграмме, при пороге сходства 68% данные разделяются на 5 тематических кластеров интересов, каждый из которых содержит соответствующие ключевые фразы. Внутри каждого кластера наблюдаются подгруппы, которые согласно алгоритму выявления связей могут формировать узкоспециализированные тематические подкатегории (подтемы), а также группы семантически эквивалентных терминов (синонимичные ряды).

Построение отношений. Отношения устанавливаются на основе семантического сходства с пороговой фильтрацией в соответствии с алгоритмом извлечения семантических отношений, описанным ниже.

Алгоритм извлечения семантических отношений

Вход: *KWS* // Список ключевых фраз

Выход: *Relation* // Список извлекаемых отношений

```

1:  for i in range(0, length(KWS)) do:
2:      for j in range(i + 1, length(KWS) - 1) do:
3:          kw1, kw2 = KWS [i], KWS [j]
4:          s = cos_sim(kw1, kw2)
5:          if s > 0.9: Relation(kw1, kw2) = synonym // синонимичность
6:          if s < 0.6: Relation(kw1, kw2) = ∅ // отсутствие связи
7:          if 0.6 < s < 0.9:
8:              Relation(kw1, kw2) = search_wikiData(kw1, kw2)
9:              if Relation(kw1, kw2) == ∅:
10:                 Relation(kw1, kw2) = related
11:         end
12:     end
13: Return Relation

```

Для ключевых фраз с оценкой близости в диапазоне от 0.6-0.7 до 0.9 используется Wikidata для проверки определенных отношений (например, синонимия, часть-целое, подкласс) между парами фраз. Пары, не имеющие определенных отношений в Wikidata, маркируются обобщенной меткой "has-relation", обозначающей наличие тематической связи подчиненного характера.

Таким образом, данный алгоритм извлекает следующие типы отношений:

- ◆ синонимия (сходства >90% или 60-90% при подтверждении через Wikidata);
- ◆ отношения: часть-целое (part of); более широкое понятие (Broader); более узкое понятие (Narrower); subClassOf верифицируются через Wikidata при сходстве 60-90%;
- ◆ общая (нетипизированная) связь (с доверительным уровнем 60-90%);
- ◆ отсутствие связи \emptyset .

Например, косинусное сходство между векторами S-BERT для фразы «машинного обучения»¹ и «искусственного интеллекта» составляет 0.72. Это указывает на то, что требуется дополнительный шаг для определения конкретного типа отношения. Для уточнения взаимосвязи используется WikiData, которая подтверждает, что «машинное обучение» является подклассом «искусственного интеллекта». В данном эксперименте рассматриваются только два типа отношений: синонимы и общее отношение (related), указывающее на наличие семантической связи без использования WikiData.

$$\text{relation_type} = \begin{cases} \text{синонимы (synonymous) если } \text{sim}(v_i, v_j) \geq \theta_{\text{syn}}, \\ \text{общая связь (related) если } \theta_{\text{rel}} \leq \text{sim}(v_i, v_j) < \theta_{\text{syn}}, \end{cases} \quad (1)$$

где порог синонимии: $\theta_{\text{syn}} = 0.9$, порог связанности: $\theta_{\text{rel}} = 0.6$, и минимальная сила отношения: $\text{min_strength} = 0.4$.

После настройки параметров и выбора подходящих методов для построения онтологии из текста можно нажать кнопку «Построить онтологию», показанную на рис. 3 интерфейса. Затем приложение выполняет построение онтологии и визуализирует её. Одновременно с этим вычисляется набор метрик, демонстрирующих степень эффективности полученной онтологии. Далее приводится подробное описание этих метрик и результатов.

Метрики оценки онтологии. Для оценки эффективности онтологии используется набор критериев, которые отражают различные аспекты качества онтологии, построенной из текста. Часть критериев относится к алгоритму кластеризации и формированию тематических групп, а другая часть – к структуре полученной сети взаимосвязей.

Иерархическая кластеризация (Agglomerative Clustering) применяется для группировки семантически близких фраз. Алгоритм работает по принципу "снизу вверх", объединяя наиболее близкие кластеры на каждом шаге. Мера расстояния между кластерами вычисляется по формуле:

$$D(C_i, C_j) = 1 - \text{sim}(\mu_i, \mu_j), \quad (2)$$

где μ_i и μ_j – центроиды кластеров.

Для оценки качества разделения кластеров используются две метрики: Силуэтный коэффициент и Индекс Калински-Харабаза [32].

Силуэтный коэффициент (Silhouette coefficient) – метрика для оценки качества кластеризации, которая показывает, насколько хорошо объекты внутри кластеров отделены от объектов других кластеров. Она измеряет, насколько похож объект на свой собственный кластер (сплоченность) по сравнению с другими кластерами (разделимость).

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}, \quad (3)$$

где $a(i)$ – среднее расстояние внутри кластера, $b(i)$ – расстояние до ближайшего соседнего кластера.

Индекс Калински-Харабаза (Calinski-Harabasz Index) – метрика оценки качества кластеризации, основанная на соотношении межкластерной дисперсии (разделимость) и внутрикластерной дисперсии (компактность).

¹ machine learning - Wikidata.

$$CH = \frac{\text{Межкластерная дисперсия}/(k-1)}{\text{Внутрикластерная дисперсия}/(n-k)}, \quad (4)$$

где k – число кластеров, n – число объектов.

Кроме того, используются следующие структурные метрики:

- ◆ Средний размер кластера, который показывает степень детализации онтологии:

$$ACS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_i|; \quad (5)$$

- ◆ Плотность отношений измеряет связанность онтологии:

$$RD = \frac{2 \cdot |E|}{|V| \cdot (|V| - 1)}, \quad (6)$$

Семантическая когерентность:

Внутрикластерное сходство оценивает семантическую однородность:

$$\text{IntraSim}(C_i) = \frac{2}{|C_i| \cdot (|C_i| - 1)} \sum_{x, y \in C_i} \text{sim}(x, y); \quad (7)$$

Межкластерное сходство измеряет дискриминативность кластеров:

$$\text{InterSim} = \frac{1}{k(k-1)} \sum_{i \neq j} \text{sim}(\mu_i, \mu_j), \quad (8)$$

Коэффициент когерентности показывает отношение внутрикластерной к межкластерной близости:

$$\text{Coherence_Ratio} = \text{IntraSim}/\text{InterSim}, \quad (9)$$

Онтология представляется как взвешенный граф $G(V, E, w)$, где: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множество концептов (вершин); $E \subseteq V \times V$ – семантические отношения (ребра); $w: E \rightarrow [0,1]$ – функция весов, определяющая силу отношений

Коэффициент кластеризации измеряет локальную плотность:

$$C_i = \frac{2 \cdot e_i}{k_i \cdot (k_i - 1)}, \quad (10)$$

где e_i – число связей между соседями вершины i , k_i – степень вершины.

Связные компоненты показывают структурную целостность онтологии. Компонента связности – это максимальное подмножество вершин, где между любой парой вершин существует путь.

Временная сложность алгоритма построения онтологии:

- ◆ Извлечение ключевых фраз: $O(n \cdot m)$ где n – количество документов, m – средняя длина документа.

- ◆ Кластеризация: $O(n^2 \log(n))$ для иерархической кластеризации.

- ◆ Построение отношений: $O(k^2)$ где k – количество кластеров.

3. Результаты вычислительного эксперимента по оценке онтологии. На вход алгоритма подается коллекция текстов на естественном языке. Выходом приложения является построенная онтология и расчетные метрики её оценки. Система демонстрирует стабильные результаты при различных параметрах:

- ◆ Силуэтный коэффициент: 0.3-0.6.
- ◆ Средний размер кластера: 4-8 фраз.
- ◆ Плотность отношений: 3-8 связей на концепт.
- ◆ Внутрикластерное сходство: ≥ 0.7 .

В результате проведенного эксперимента была сформирована оптимальная кластерная структура, состоящая из 18 семантических кластеров, которые объединили 70 ключевых фраз. Средний размер кластера, составивший 3.89 элемента, свидетельствует о достижении баланса между излишней дробностью и чрезмерным обобщением, так называемой «зоны Златовласки». Данная структура демонстрирует репрезентативную группировку концептов, полноценное покрытие предметной области и смысловую целостность каждого кластера.

Таблица 1

Показатели качества построения отношений

Количество документов	02
Среднее количество слов в документе	20.5
Количество извлеченных фраз	082
Число кластеров	18
Число фраз	70
Средний размер кластера	3,89
Среднее внутрикластерное сходство	84,1
Оценка силуэта	0,444
Количество связей	404
Средняя сила связи	0,803
Плотность связей	5,77

Важным результатом является высокая семантическая когерентность модели. Показатель внутрикластерного сходства, достигший значения 0.841, указывает на исключительное качество кластеризации. Анализ выявляет наличие сильных семантических связей внутри кластеров, их четкую тематическую согласованность и формирование осмысленных семантических концептов в каждой группе.

Качество семантических отношений в построенной сети также оценивается как высокое. Средняя сила установленных связей находится на уровне 0.803, что подчеркивает их значимость и информационную ценность. Сеть характеризуется низким уровнем шума и подтверждает эффективность примененного принципа «качество над количеством».

Оценка метрических показателей подтверждает устойчивость модели. Значение силуэтного коэффициента (0.444) указывает на удовлетворительное разделение кластеров с минимальным перекрытием и четкими границами, что оставляет потенциал для дальнейшей оптимизации до уровня 0.5+ (рис. 5).

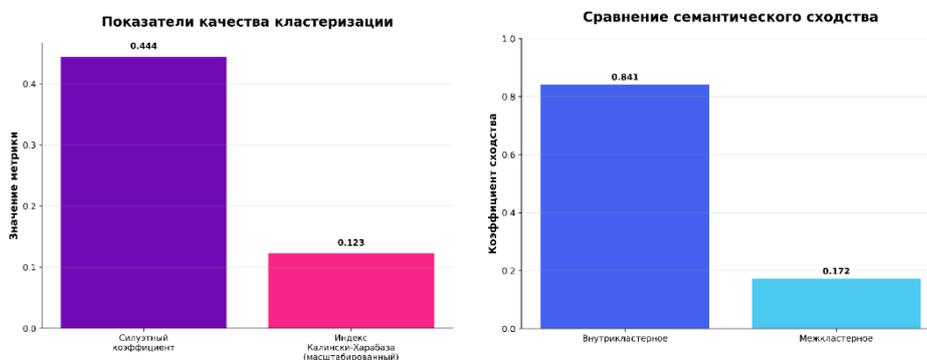


Рис. 5. Показатели качества кластеризации

Показатель плотности отношений (5.77) отражает оптимальную связность сети и сбалансированность ее структуры, обеспечивающую эффективные паттерны информационных потоков. Само собой разумеется, что количество общих связей (related) превышает количество связей-синонимов (synonyms), поскольку данная категория включает различные типы отношений, которые могут быть точно определены с использованием внешних источников знаний, таких как Wikidata. Однако в рамках данного эксперимента было решено ограничиться общей классификацией, поскольку основной целью исследования является оценка качества онтологии с точки зрения её структуры и согласованности, а также для снижения вычислительной сложности эксперимента (рис. 6).

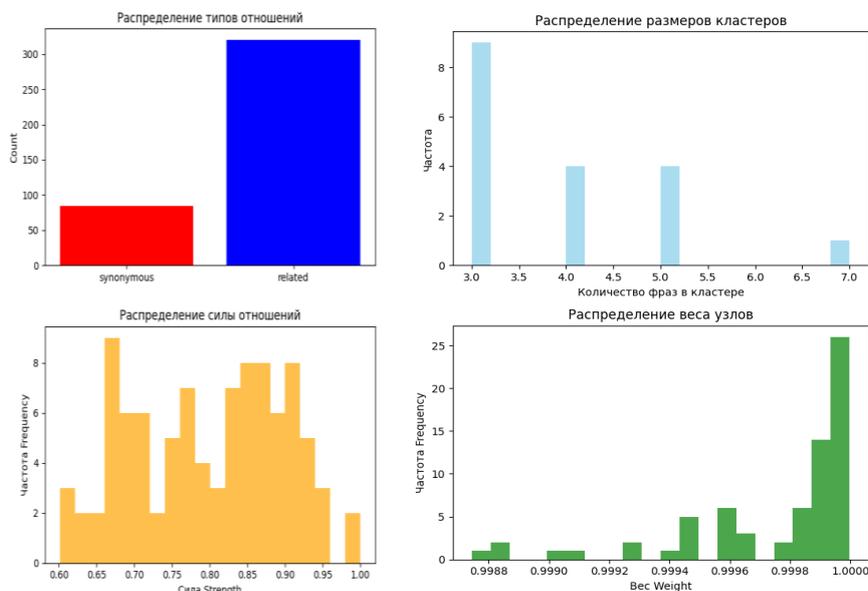


Рис. 6. Показатели качества построения отношений

Коэффициент ретенции, составивший 37% (сохранение 70 из 188 исходных фраз), свидетельствует о высокой точности фильтрации при сохранении полноты покрытия предметной области.

Практическая значимость работы заключается в высоком потенциале применения полученной онтологической модели в таких областях, как рекомендательные системы, семантический поиск, управление знаниями и категоризация контента. Модель обеспечивает пользователям четкую тематическую структуру, осмысленные семантические связи и надежную организацию знаний.

Выявленные направления для оптимизации, такие, как повышение силуэтного коэффициента и уточнение границ кластеров, незначительны и не оказывают отрицательного влияния на результаты. В целом, работа подтверждает практическую применимость разработанной методики в задачах обработки естественного языка и управления знаниями.

Система эффективно балансирует между точностью и полнотой, обеспечивая создание качественных семантических структур для практических приложений. Многоуровневый подход позволяет выявлять как структурные проблемы, так и семантические, что делает систему ценным инструментом для разработки и валидации онтологий в промышленных приложениях.

Заключение. В данной работе предложено комплексное решение автоматического построения онтологического профиля для решения проблем веб-персонализации. Ключевым вкладом является разработка целостного конвейера обработки данных (pipeline), который интегрирует усовершенствованные алгоритмы автора (такие как метод извлечения ключевых фраз FBKE и алгоритм разрешения лексической неоднозначности Lesk-BERT) с признанными инструментами обработки естественного языка. Проведенный вычислительный эксперимент подтвердил эффективность метода и продемонстрировал способность системы создавать непротиворечивые и релевантные онтологические структуры. Практическая значимость исследования заключается в потенциале применения онтологии в рекомендательных системах, семантическом поиске и управлении знаниями. Модель обеспечивает четкую тематическую структуру с осмысленными семантическими связями, способствуя снижению когнитивной нагрузки пользователя. Перспективы дальнейших исследований включают интеграцию онтологии в задачи персонализации веб-контента, а также проведение сравнительных экспериментов для оценки производительности алгоритмов против современных аналогов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Garrigós I., Gomez J., Houben G.-J. Specification of personalization in web application design // Information Software Technology. – 2010. – Vol. 52, No. 9. – P. 991-1010.
2. Мертѣхин А.А. Интернет-зависимое поведение и перегрузка информацией // Северо-Кавказский психологический вестник. – 2012. – Т. 10, № 3. – P. 24-27.
3. Meister F., Shin D., Andrews L. “Getting to know you”: What’s new in personalization technologies // E-Doc. – 2002. – Vol. 16, No. 2. – P. 8-8.
4. Pressman R.S., Lowe D. Web engineering // Software Engineering: A Practitioner’s Perspective. – 2000. – P. 769-798.
5. Ginige A., Murugesan S. Web Engineering: A Holistic, Disciplined Approach to Web-Based System Development // 12 th International World Wide Web Conference. – 2003. – Vol. 3. – Web Engineering.
6. Tao X., Li Y., Zhong N. A personalized ontology model for web information gathering // IEEE transactions on knowledge data engineering. – 2010. – Vol. 23, No. 4. – P. 496-511.
7. Guo Q., Chen W., Wan H. AOL4PS: A large-scale data set for personalized search // Data Intelligence. – 2021. – Vol. 3. – AOL4PS. – No. 4. – P. 548-567.
8. Farid M., Elgohary R., Moawad I., Roushdy M. User profiling approaches, modeling, and personalization // Proceedings of the 11th international conference on informatics & systems (INFOS 2018). – 2018.
9. Mobasher B. Data mining for web personalization // The adaptive web. – Springer, 2007. – P. 90-135.
10. Gauch S., Speretta M., Chandramouli A., Micarelli A. User profiles for personalized information access // The adaptive web. – 2007. – P. 54-89.
11. Cantador I., Bellogín A., Castells P. Ontology-based personalised and context-aware recommendations of news items // 2008 IEEE/WIC/ACM international conference on web intelligence and intelligent agent technology. – IEEE, 2008. – Vol. 1. – P. 562-565.
12. Leung K.W.-T., Lee D.L. Deriving concept-based user profiles from search engine logs // IEEE Transactions on knowledge and data engineering. – 2009. – Vol. 22, No. 7. – P. 969-982.
13. Liu F., Yu C., Meng W. Personalized web search by mapping user queries to categories // Proceedings of the eleventh international conference on Information and knowledge management CIKM02: Eleventh ACM International Conference on Information and Knowledge Management. – McLean Virginia USA: ACM, 2002. – P. 558-565.
14. Penas P., Del Hoyo R., Vea-Murguía J., González C., Mayo S. Collective knowledge ontology user profiling for Twitter—automatic user profiling // 2013 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT). – IEEE, 2013. – Vol. 1. – P. 439-444.
15. Gauch S., Chaffee J., Pretschner A. Ontology-based personalized search and browsing // Web Intelligence and Agent Systems: An international Journal. – 2003. – Vol. 1, No. 3-4. – P. 219-234.
16. Xu Y., Wang K., Zhang B., Chen Z. Privacy-enhancing personalized web search // Proceedings of the 16th international conference on World Wide Web WWW’07: 16th International World Wide Web Conference. – Banff Alberta Canada: ACM, 2007. – P. 591-600.
17. Abián D., Guerra F., Martínez-Romanos J., Trillo-Lado R. Wikidata and DBpedia: A Comparative Study // Semantic Keyword-Based Search on Structured Data Sources: Lecture Notes in Computer Science / eds. J. Szymański, Y. Velegrakis. – Cham: Springer International Publishing, 2018. – Vol. 10546. – Wikidata and DBpedia. – P. 142-154. – ISBN 978-3-319-74496-4.
18. Lehmann J., Isele R., Jakob M., Jentzsch A., Kontokostas D., Mendes P.N., Hellmann S., Morsey M., Van Kleef P., Auer S. Dbpedia—a large-scale, multilingual knowledge base extracted from wikipedia // Semantic web. – 2015. – Vol. 6, No. 2. – P. 167-195.
19. Eke C.I., Norman A.A., Shuib L., Nweke H.F. A survey of user profiling: State-of-the-art, challenges, and solutions // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 144907-144924.
20. Purificato E., Boratto L., De Luca User E.W. Modeling and User Profiling: A Comprehensive Survey // arXiv preprint arXiv:2402.09660. – 2024.
21. Bird S. NLTK: the natural language toolkit // Proceedings of the COLING/ACL 2006 Interactive Presentation Sessions. – 2006. – P. 69-72.
22. Miller G.A. WordNet: a lexical database for English // C. A. – 1995. – Vol. 38. – P. 39-41.
23. Vasiliev Y. Natural language processing with Python and spaCy: A practical introduction. – No Starch Press, 2020. – ISBN 1-71850-052-1.
24. Lops P., De Gemmis M., Semeraro G. Content-based recommender systems: State of the art and trends // Recommender systems handbook. – 2011. – P. 73-105.
25. Poelmans J., Ignatov D.I., Kuznetsov S.O., Dedene G. Formal concept analysis in knowledge processing: A survey on applications // Expert Systems with Applications. – 2013. – Vol. 40, No. 16. – P. 6538-6560.
26. Poelmans J., Ignatov D.I., Viaene S., Dedene G., Kuznetsov S.O. Text mining scientific papers: a survey on FCA-based information retrieval research // Advances in Data Mining. Applications and Theoretical Aspects: 12th Industrial Conference, ICDM 2012, Berlin, Germany, July 13-20, 2012. Proceedings 12. – Springer, 2012. – P. 273-287.

27. Маннинг К.Д., Рагхаван П., Шютце Х. Введение в информационный поиск. – 2011.
28. Gruber T. What is an Ontology. – 1993.
29. Мохаммад Ж.Х., Мансур А.М., Кравченко Ю.А., Бова В.В. Метод извлечения ключевых фраз на основе новой функции ранжирования // Информационные технологии. – 2022. – Т. 9, № 28. – Р. 465-474.
30. Кравченко Ю.А., Мансур А.М., Хуссайн М.Ж. Модифицированный метод устранения неоднозначности смысла слов, основанный на методах распределенного представления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 3.
31. Мохаммад Ж.Х., Мансур А.М., Кравченко Ю.А., Кравченко Д.Ю. Метод автоматического извлечения ключевых слов // Международный научно-технический конгресс «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2022». – 2022. – Р. 91-97.
32. Wang X., Xu Y. An improved index for clustering validation based on Silhouette index and Calinski-Harabasz index // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 569. – P. 052024.
33. Мохаммад Ж.Х., Мансур А.М., Кравченко Ю.А. Перспективы применения метода извлечения ключевых фраз FBKE в задачах персонализации веб-контента // XX Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2022)». – Таганрог, 2022. – Р. 206.
34. Мохаммад Ж.Х., Мансур А.М., Кравченко Ю.А. Модифицированный метод устранения неоднозначности смысла слов, основанный на методах распределенного представления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 3 (220). – Р. 92-101.
35. Мохаммад Ж.Х., Мансур А. Модифицированный метод устранения семантической неоднозначности слов. – Таганрог, 2022.

REFERENCES

1. Garrigós I., Gomez J., Houben G.-J. Specification of personalization in web application design, *Information Software Technology*, 2010, Vol. 52, No. 9, pp. 991-1010.
2. Mertezhin A.A. Internet-zavisimoe povedenie i peregruzka informatsiy [Internet-dependent behavior and information overload], *Severo-Kavkazskiy psikhologicheskii vestnik* [North Caucasian Psychological Bulletin], 2012, Vol. 10, No. 3, pp. 24-27.
3. Meister F., Shin D., Andrews L. “Getting to know you”: What’s new in personalization technologies, *E-Doc*, 2002, Vol. 16, No. 2, pp. 8-8.
4. Pressman R.S., Lowe D. Web engineering, *Software Engineering: A Practitioner’s Perspective*, 2000, pp. 769-798.
5. Ginige A., Murugesan S. Web Engineering: A Holistic, Disciplined Approach to Web-Based System Development, *12 th International World Wide Web Conference*, 2003, Vol. 3. Web Engineering.
6. Tao X., Li Y., Zhong N. A personalized ontology model for web information gathering, *IEEE transactions on knowledge data engineering*, 2010, Vol. 23, No. 4, pp. 496-511.
7. Guo Q., Chen W., Wan H. AOL4PS: A large-scale data set for personalized search, *Data Intelligence*, 2021, Vol. 3, AOL4PS, No. 4, pp. 548-567.
8. Farid M., Elgohary R., Moawad I., Roushdy M. User profiling approaches, modeling, and personalization, *Proceedings of the 11th international conference on informatics & systems (INFOS 2018)*, 2018.
9. Mobasher B. Data mining for web personalization, *The adaptive web*. Springer, 2007, pp. 90-135.
10. Gauch S., Speretta M., Chandramouli A., Micarelli A. User profiles for personalized information access, *The adaptive web*, 2007, pp. 54-89.
11. Cantador L., Bellogín A., Castells P. Ontology-based personalised and context-aware recommendations of news items, *2008 IEEE/WIC/ACM international conference on web intelligence and intelligent agent technology*. IEEE, 2008, Vol. 1, pp. 562-565.
12. Leung K.W.-T., Lee D.L. Deriving concept-based user profiles from search engine logs, *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, 2009, Vol. 22, No. 7, pp. 969-982.
13. Liu F., Yu C., Meng W. Personalized web search by mapping user queries to categories, *Proceedings of the eleventh international conference on Information and knowledge management CIKM02: Eleventh ACM International Conference on Information and Knowledge Management*. McLean Virginia USA: ACM, 2002, pp. 558-565.
14. Penas P., Del Hoyo R., Vea-Murguía J., González C., Mayo S. Collective knowledge ontology user profiling for Twitter-automatic user profiling, *2013 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT)*. IEEE, 2013, Vol. 1, pp. 439-444.
15. Gauch S., Chaffee J., Pretschner A. Ontology-based personalized search and browsing, *Web Intelligence and Agent Systems: An international Journal*, 2003, Vol. 1, No. 3-4, pp. 219-234.
16. Xu Y., Wang K., Zhang B., Chen Z. Privacy-enhancing personalized web search, *Proceedings of the 16th international conference on World Wide Web WWW’07: 16th International World Wide Web Conference*. Banff Alberta Canada: ACM, 2007, pp. 591-600.

17. *Abián D., Guerra F., Martínez-Romanos J., Trillo-Lado R.* Wikidata and DBpedia: A Comparative Study, *Semantic Keyword-Based Search on Structured Data Sources: Lecture Notes in Computer Science*, eds. J. Szymański, Y. Velegakis. Cham: Springer International Publishing, 2018, Vol. 10546. Wikidata and DBpedia, pp. 142-154. ISBN 978-3-319-74496-4.
18. *Lehmann J., Isele R., Jakob M., Jentzsch A., Kontokostas D., Mendes P.N., Hellmann S., Morsey M., Van Kleef P., Auer S.* Dbpedia—a large-scale, multilingual knowledge base extracted from Wikipedia, *Semantic web*, 2015, Vol. 6, No. 2, pp. 167-195.
19. *Eke C.I., Norman A.A., Shuib L., Nweke H.F.* A survey of user profiling: State-of-the-art, challenges, and solutions, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 144907-144924.
20. *Purificato E., Boratto L., De Luca User E.W.* Modeling and User Profiling: A Comprehensive Survey, *arXiv preprint arXiv:2402.09660*, 2024.
21. *Bird S.* NLTK: the natural language toolkit, *Proceedings of the COLING/ACL 2006 Interactive Presentation Sessions*, 2006, pp. 69-72.
22. *Miller G.A.* WordNet: a lexical database for English, *C. A.*, 1995, Vol. 38, pp. 39-41.
23. *Vasiliev Y.* Natural language processing with Python and spaCy: A practical introduction. No Starch Press, 2020. ISBN 1-71850-052-1.
24. *Lops P., De Gemmis M., Semeraro G.* Content-based recommender systems: State of the art and trends, *Recommender systems handbook*, 2011, pp. 73-105.
25. *Poelmans J., Ignatov D.I., Kuznetsov S.O., Dedene G.* Formal concept analysis in knowledge processing: A survey on applications, *Expert Systems with Applications*, 2013, Vol. 40, No. 16, pp. 6538-6560.
26. *Poelmans J., Ignatov D.I., Viaene S., Dedene G., Kuznetsov S.O.* Text mining scientific papers: a survey on FCA-based information retrieval research, *Advances in Data Mining. Applications and Theoretical Aspects: 12th Industrial Conference, ICDM 2012, Berlin, Germany, July 13-20, 2012. Proceedings 12*. Springer, 2012, pp. 273-287.
27. *Manning K.D., Raghavan P., Shyuttse Kh.* Vvedenie v informatsionnyy poisk [Introduction to information retrieval], 2011.
28. *Gruber T.* What is an Ontology, 1993.
29. *Mokhammad Zh.Kh. Mansur A.M., Kravchenko Yu.A., Bova V.V.* Metod izvlecheniya klyuchevykh fraz na osnove novoy funktsii ranzhirovaniya [Method for extracting key phrases based on a new ranking function], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2022, Vol. 9, No. 28, pp. 465-474.
30. *Kravchenko Yu.A., Mansur A.M., Khussayn M.Zh.* Modifitsirovannyy metod ustraneniya neodnoznachnosti smysla slov, osnovanny na metodakh raspredelenno predstavljeniya [Modified method for disambiguating the meaning of words based on distributed representation methods], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 3.
31. *Mokhammad Zh.Kh., Mansur A.M., Kravchenko Yu.A., Kravchenko D.Yu.* Metod avtomaticheskogo izvlecheniya klyuchevykh slov [Method of automatic extraction of keywords], *Mezhdunarodnyy nauchno-tekhnicheskiiy kongress «Intellektual'nye sistemy i informatsionnye tekhnologii – 2022»* [International Scientific and Technical Congress "Intelligent Systems and Information Technologies - 2022"], 2022, pp. 91-97.
32. *Wang X., Xu Y.* An improved index for clustering validation based on Silhouette index and Calinski-Harabasz index, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019, Vol. 569, pp. 052024.
33. *Mokhammad Zh.Kh., Mansur A.M., Kravchenko Yu.A.* Perspektivy primeneniya metoda izvlecheniya klyuchevykh fraz FBKE v zadachakh personalizatsii veb-kontenta [Prospects for applying the FBKE keyword extraction method in web content personalization tasks], *XX Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie (ITSAU-2022)»* [XX All-Russian scientific conference of young scientists, graduate students and students "Information technology, systems analysis and management (ITSAU-2022)], Taganrog, 2022, pp. 206.
34. *Mokhammad Zh.Kh., Mansur A.M., Kravchenko Yu.A.* Modifitsirovannyy metod ustraneniya neodnoznachnosti smysla slov, osnovanny na metodakh raspredelenno predstavljeniya [A modified method for disambiguating word meanings based on distributed representation methods], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 3 (220), pp. 92-101.
35. *Mokhammad Zh.Kh., Mansur A.* Modifitsirovannyy metod ustraneniya semanticheskoy neodnoznachnosti slov [A modified method for disambiguating semantic words]. Taganrog, 2022.

Мохаммад Жуман Хуссейн – Южный федеральный университет; e-mail: zmohammad@sfedu.com; mahammad.hs.juman@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +79880158697; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; соискатель.

Mohammad Juman Hussain – Southern Federal University; e-mail: zmohammad@sfedu.ru, mahammad.hs.juman@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79880158697; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; applicant.

В.И. Данильченко, В.В. Бова**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ БАС**

Рассматривается задача интеллектуального параметрического прогнозирования и оптимизации траектории движения беспилотной авиационной системы (БАС) с применением эволюционных алгоритмов и методов машинного обучения. Актуальность исследования обусловлена многокритериальностью и высокой сложностью процессов формирования траектории движения БАС, а также необходимостью точной и своевременной оценки её полётных параметров. Это особенно важно для обеспечения надёжности, безопасности и эффективного выполнения полётных задач в условиях эксплуатации БАС, включая сценарии, связанные с функционированием критически значимых объектов инфраструктуры. Цель исследования заключается в повышении точности диагностики траекторных параметров и надёжности параметрического прогнозирования траекторий движения БАС в условиях неопределённости и многокритериальности рассматриваемой задачи. В работе предлагается гибридный подход, включающий генетический алгоритм (ГА), алгоритм роя частиц (PSO) с моделью машинного обучения XGBoost, обеспечивающей адаптивную оценку качества формируемых решений. Реализован вычислительный программный комплекс, включающий механизмы селекции, рекомбинации, мутации и элитного наследования, а также модуль машинного обучения для валидации траектории маршрута и связанных параметров. Проведён вычислительный эксперимент, в рамках которого выполнен сравнительный анализ эффективности ГА и PSO при различных сценариях их работы. Тестирование выполнялось на отраслевых наборах данных при различном количестве итераций. В ходе вычислительного эксперимента выявлено преимущество генетического алгоритма, а именно повышение качества проектных решений на 14–17%. Результаты исследования демонстрируют высокую адаптивность и практическую применимость в задачах моделирования, параметрического прогнозирования и маршрутизации, а также указывают на потенциал интеграции с интеллектуальными системами навигации и мониторинга БАС. Материалы статьи представляют практический интерес для специалистов в области разработки и эксплуатации БАС, а также для исследователей, занимающихся задачами многокритериального планирования маршрутов, параметрического прогнозирования и повышения надёжности функционирования БАС.

Генетический алгоритм; алгоритм роя частиц; эволюционные вычисления; машинное обучение; XGBoost; маршрутизация; параметрическое прогнозирование; интеллектуальные алгоритмы.

V.I. Danilchenko, V.V. Bova**INTELLIGENT METHODS OF PARAMETRIC FORECASTING AND OPTIMIZATION OF UAV TRAJECTORIES**

This paper examines the problem of intelligent parametric forecasting and trajectory optimization for unmanned aircraft systems (UAS) using evolutionary algorithms and machine learning methods. The relevance of the study stems from the multi-criteria and high complexity of UAS trajectory generation processes, as well as the need for accurate and timely assessment of its flight parameters. This is particularly important for ensuring the reliability, safety, and efficient performance of flight missions in UAS operating conditions, including scenarios related to the operation of critical infrastructure facilities. The objective of the study is to improve the accuracy of trajectory parameter diagnostics and the reliability of parametric forecasting of UAS trajectories under conditions of uncertainty and the multi-criteria nature of the problem. The paper proposes a hybrid approach incorporating a genetic algorithm (GA), a particle swarm algorithm (PSO), and an XGBoost machine learning model that provides adaptive assessment of the quality of the generated solutions. A computational software package has been implemented, including selection, recombination, mutation, and elite inheritance mechanisms, as well as a machine learning module for validating route trajectories and associated parameters. A computational experiment was conducted, which compared the effectiveness of GA and PSO under various operating scenarios. Testing was performed on industry-specific datasets with varying numbers of iterations. The computational experiment revealed the advantage of the genetic algorithm, namely, a 14–17% improvement in the quality of design solutions. The results of the study demonstrate high adaptability and practical applicability in modeling, parametric forecasting, and routing tasks, and also indicate the potential for integration with intelligent UAS navigation and monitoring systems. The article's materials are of practical interest to specialists in the field of UAS development and operation, as well as to researchers working on multi-criteria route planning, parametric forecasting, and improving the reliability of UAS operations.

Genetic algorithm; particle swarm optimization; evolutionary computation; machine learning; XGBoost; Routing; parametric forecasting; intelligent algorithms.

Введение. Современные БАС демонстрируют устойчивую тенденцию к усложнению архитектуры и взаимодействующих компонентов, одновременно предъявляя высокие требования к ключевым эксплуатационным характеристикам – надёжности, устойчивости функционирования и согласованности траекторных параметров в динамически изменяющейся среде [1–3].

Особую актуальность интеллектуальные методы приобретают в транспортных системах, включая применение БАС, где сложность процессов, масштаб взаимодействующих объектов и высокая динамичность эксплуатационных условий формируют повышенные требования к прогнозированию траекторных параметров и мониторингу состояния полётной среды [4–6]. В условиях динамично изменяющейся полётной среды беспилотные авиационные системы сталкиваются с неопределённостью, влияющей на точность заданной траектории и устойчивость выполнения миссии. Изменения метеоусловий, вариативность внешних факторов и ограничения полётного пространства усложняют процесс выбора оптимальных параметров движения. В таких сценариях требуется применение интеллектуальных методов, способных обеспечивать точное параметрическое прогнозирование и корректировку траектории в реальном времени.

Традиционные методы анализа, основанные на детерминированных моделях и жёстких формализациях, оказываются недостаточно эффективными в условиях реальных полётных сценариев, которые характеризуются высокой неопределённостью, неполнотой исходных данных и выраженными нелинейными взаимосвязями между параметрами движения БАС [7–9]. Актуальность разработки новых подходов обусловлена комплексом взаимосвязанных факторов. В процессе мониторинга формируются нечеткие, частично противоречивые и неоднородные данные, поступающие от разнородных сенсорных и измерительных подсистем, что существенно осложняет формирование достоверной оценки. Многокритериальный характер задач анализа траекторных параметров БАС требует одновременного учёта показателей безопасности полёта, энергоресурса и эксплуатационных ограничений, влияющих на устойчивость и надёжность выполнения миссии [10, 11]. Дополнительные трудности обусловлены тем, что процессы формирования траектории протекают в динамически изменяющихся условиях эксплуатации, где переменные внешние факторы существенно влияют на параметры полёта и устойчивость движения БАС. Ещё одним критически важным аспектом является сложность формализации экспертных знаний специалистов, обладающих значительным практическим опытом, но выражающих свои оценки преимущественно в качественной форме. Рациональным механизмом компенсации выявленных ограничений является использование современных интеллектуальных методов анализа и прогнозирования, способных работать с неполными, неоднородными и статистически нестабильными данными. В отличие от классических детерминированных моделей, основанных на четко фиксированных зависимостях и предположении о стационарности параметров, интеллектуальные методы обеспечивают учёт неопределённости, адаптацию к динамическим изменениям и выявление скрытых функциональных связей в многомерных выборках [1, 6]. Эти свойства определяют применимость интеллектуальных методов в задачах диагностики, прогнозирования и анализа параметров полёта, включая сценарии, связанные с мониторингом объектов транспортной инфраструктуры. В подобных условиях особую значимость приобретают современные интеллектуальные технологии, обеспечивающие обработку разнородных данных и повышение качества принимаемых решений.

При решении задач прогнозирования и оценки траекторных параметров БАС особую значимость приобретают современные интеллектуальные технологии, применяемые для обработки полётных данных и поддержки решений, связанных с безопасностью и устойчивостью движения. Одним из эффективных инструментов является нечёткая логика (Fuzzy Logic), позволяющая формализовать качественные экспертные суждения, такие как «высокий уровень риска отклонения», «средняя степень нестабильности траектории» или «незначительное влияние внешних факторов». Механизмы нечёткого вывода дают возможность учитывать субъективный опыт операторов и специалистов, что особенно важно при анализе полётных ситуаций, параметры которых не всегда поддаются строгому количественному описанию [7].

Наряду с нечёткими моделями применяются нейронные сети (Artificial Neural Networks), которые благодаря способности к самообучению и выявлению скрытых нелинейных зависимостей позволяют решать задачи прогнозирования траекторных параметров БАС и оценки устойчивости полёта. Использование исторических данных о параметрах движения, внешних воздействиях и условиях эксплуатации даёт возможность формировать устойчивые предиктивные модели, обеспечивающие высокую точность оценки вероятности отклонений траектории и поддерживающие переход к проактивным стратегиям управления полётом [8].

В задачах, требующих поиска квазиоптимальных решений в сложных многомерных пространствах, используются эволюционные алгоритмы, в частности генетические алгоритмы (ГА), представляющие собой класс метаэвристических поисковых методов, основанных на принципах естественного отбора. Популяционный подход, основанный на применении операторов селекции, скрещивания и мутации, позволяет генетическим алгоритмам эффективно решать многокритериальные задачи с различными ограничениями. Так же анализ нескольких альтернатив повышает вероятность нахождения квазиоптимальных решений в сложном поисковом пространстве [9]. Особую практическую значимость ГА приобретают в задачах планирования траектории, распределения ресурсов и оптимизации параметров полёта БАС. За счёт способности выполнять глобальный поиск в сложном пространстве параметров ГА позволяет формировать квазиоптимальные решения с учётом множества критериев, таких как снижение рисков, повышение уровня безопасности и сокращение времени выполнения миссии. Такие возможности генетических алгоритмов делают перспективным их комбинирование, гибридизацию и интеграцию с другими методами, объединяя их преимущества и обеспечивая более высокое качество решений. Одним из распространённых подходов являются нейро-нечёткие модели (например, ANFIS) [10], которые совмещают обучающие возможности нейронных сетей с интерпретируемостью нечётких правил. Такая интеграция генетического алгоритма, выполняющего глобальный поиск оптимальных параметров, с нечёткими моделями, обрабатывающими экспертные знания, позволяет формировать устойчивые и адаптивные системы поддержки принятия решений при построении траекторий БАС [11, 12].

Таким образом, применение современных интеллектуальных методов анализа и прогнозирования открывает новые возможности для повышения качества и эффективности решения задач, связанных с формированием и оптимизацией траектории движения БАС. Данные методы обеспечивают переход от реактивных форм управления к проактивным стратегиям, основанных на раннем выявлении потенциальных отклонений, оценке рисков и прогнозировании поведения системы в условиях неопределённости.

В рамках данной работы решается комплексная научно-техническая задача, включающая формализацию проблемы прогнозирования параметров траектории движения БАС, разработку гибридного генетического алгоритма с интегрированной моделью XGBoost для динамической оценки качества решений, создание специализированного программного комплекса, а также проведение серии верификационных вычислительных экспериментов, подтверждающих работоспособность и эффективность предложенного решения.

Разработка и внедрение данного интеллектуального программного комплекса прогнозирования и оптимизации траектории БАС позволит повысить уровень эксплуатационной безопасности, снизить затраты и обеспечить устойчивое выполнение полётных задач в долгосрочной перспективе. Перспективные направления дальнейших исследований включают развитие адаптивных гибридных моделей, расширение методов интеграции разнородных данных и использование технологий обработки больших массивов информации для повышения качества траекторных решений и эффективности автономного управления.

Актуальность проблемы. Многокритериальный характер рассматриваемой задачи, осложнённый необходимостью обработки значительных объёмов полётных данных в режиме, близком к реальному времени, существенно снижает эффективность традиционных поисковых методов. Классические подходы не обладают достаточной гибкостью и устойчивостью при изменении условий эксплуатации, что ограничивает их примени-

мость в реальных сценариях управления БАС. Это обуславливает активное развитие интеллектуальных методов, способных учитывать множество взаимосвязанных параметров, адаптироваться к динамике исходных данных и обеспечивать более качественные и эффективные траекторные решения.

Постановка задачи. Проблема определения оптимальных параметров полётного задания формулируется как многокритериальная задача, требующая обработки больших объёмов данных и выбора системы оценочных критериев. Целью является получение квазиоптимальной комбинации управляющих переменных, обеспечивающей выполнение миссии в заданных ограничениях. Математическая постановка сводится к определению набора управляющих параметров [7, 18]:

$$M = \{a, s, p, e, r\}, \quad (1)$$

где a – рабочая высота полёта (м), s – скорость полёта (м/с), p – коэффициент приоритета траектории, e – прогнозируемый энергобаланс (%), r – индекс угроз безопасности.

Для формулирования задачи и оценки ее результатов определим критерии и целевую функцию. Целевая функция представляет собой аддитивную свертку частных критериев:

$$F(M) = \lambda_1 \cdot Q_{\text{fitness}} + \lambda_2 \cdot E_{\text{energy}} + \lambda_3 \cdot S_{\text{safety}} + \lambda_4 \cdot T_{\text{time}}, \quad (2)$$

где λ_i – нормированные весовые коэффициенты, отражающие приоритет каждого критерия, Q – комплексный показатель качества маршрута, E – относительное энергопотребление (%), S – индекс риска (нормированный от 0 до 1), T – затраченное время на полет (мин).

Общая математическая формулировка задачи выражается следующим образом [7, 18]:

$$\begin{aligned} \min_m F(M) \text{ при условиях: } & g_i(\vec{M}) \leq 0, i = 1, \dots, m \\ & h_j(\vec{M}) = 0, j = 1, \dots, p, \end{aligned} \quad (3)$$

где g_i – функции ограничений в форме неравенств, задающие эксплуатационные, конструктивные и регламентные требования к маршруту, включая предельные значения высоты и скорости полёта, ограничения по энергобалансу, параметры метеорологической обстановки и условия безопасного удаления от зон повышенного риска, h_j – функции ограничений в форме равенств, задающие дополнительные жёсткие требования, такие как фиксированная геометрическая конфигурация траектории, обязательные точки входа и выхода маршрута и другие параметры, обусловленные спецификой решаемой задачи.

Метод решения поставленной задачи. Рассмотрим метод решения, включающий используемые алгоритмы и принципы формирования оптимальных траекторий движения БАС. Выделим систему ограничений, включающую комплекс эксплуатационных и технических условий, которым должен удовлетворять формируемый маршрут. К числу таких условий относятся конструктивные лимиты, определяющие допустимые диапазоны высот и скоростей полёта; атмосферные факторы, описываемые параметрами ветра, видимости и интенсивности осадков; регламенты воздушного пространства, задающие зональные ограничения на использование определённых участков территории; энергетические ограничения, связанные с допустимым уровнем расхода и текущей ёмкостью источников питания; а также временные рамки выполнения задания, определяемые максимальной продолжительностью полёта. В совокупности эти условия формализуются через функции ограничений вида $g_i(\vec{M}) \leq 0$ и $h_j(\vec{M}) = 0$, обеспечивая физическую реализуемость и безопасность решения [8, 13, 18].

Комплекс используемых оценочных показателей формируется на основе нескольких ключевых метрик, интегрируемых в целевую функцию. В их числе: комплексный показатель качества маршрута Q , отражающий рациональность построенной траектории; относительное энергопотребление E , характеризующее долю расходуемого ресурса; нормированный индекс риска S , (в диапазоне [0; 1]) определяющий степень приближения к потенциально опасным зонам; а также итоговое значение целевой функции F , фиксируемое после завершения процедуры поиска на каждой итерации. Комплексное использова-

ние указанных метрик обеспечивает объективную и сбалансированную оценку эффективности найденных решений. Полученная оценочная модель требует применения эффективного поискового инструмента.

Одним из таких инструментов является генетический алгоритм [14], который относится к классу эвристических поисковых методов, основанных на принципах эволюции и механизмах наследования признаков. ГА в задаче параметрического прогнозирования маршрутов реализует последовательный вычислительный процесс, включающий формирование исходной популяции, каждая из которых кодируется комбинацией параметров траектории и вычислением функции приспособленности с использованием предварительно обученной модели XGBoost [15]. В предложенном ГА в качестве процедуры отбора реализуется механизм «турнира», в результате которого лучшие особи выбираются для последующего скрещивания на основе значений целевой функции. Данный механизм представлен в виде псевдокода 1:

Псевдокод 1. Механизм турнирного отбора

```
def selection(self) -> List[RouteParameters]:
    selected = []
    for _ in range(self.population_size):
        tournament = random.sample(self.population, 3)
        winner = max(tournament, key=lambda x: self.fitness_function(x))
        selected.append(winner)
    return selected
```

После выполнения процедуры отбора, на следующем этапе, применяется оператор рекомбинации, обеспечивающий объединение генетической информации родительских особей и формирование нового потомства [16]. Программная реализация оператора рекомбинации представлена в виде псевдокода 2:

Псевдокод 2. Оператор рекомбинации

```
def mutate(self, route: RouteParameters) -> RouteParameters:
    if random.random() > self.mutation_rate:
        return route
    new_altitude = max(self.min_altitude, min(self.max_altitude,
        route.altitude + random.uniform(-1.0, 1.0)))
    new_speed = max(self.min_speed, min(self.max_speed,
        route.speed + random.uniform(-0.5, 0.5)))
    return RouteParameters(
        waypoints=route.waypoints,
        altitude=new_altitude,
        speed=new_speed,
        priority=route.priority if random.random() < 0.95 else random.choice(['safety', 'distance', 'time', 'shortest']),
        battery_usage=route.battery_usage )
```

Дополнительно в структуру ГА включён механизм сохранения элитных решений, обеспечивающий формирование новой популяции с обязательным их учетом [17]. На практике это реализуется путём выделения фиксированной доли лучших решений в соответствии со значениями целевой функции, после чего они без изменений включаются в состав следующего поколения. Программная реализация данного механизма приведена в виде псевдокода 3:

Псевдокод 3. Механизм сохранения элитных решений

```
elite_size = max(1, int(self.population_size * 0.05))
elites = [route for route, score in scored_population[:elite_size]]
```

Такая стратегия позволяет избежать потери наиболее качественных траекторий вследствие случайных эффектов рекомбинации и мутации, повышает устойчивость сходимости и ускоряет поиск квазиоптимальных решений. Завершающим этапом работы ГА является система условий терминации, определяющая момент завершения эволюционного процесса. Как правило, остановка вычислений осуществляется при достижении максимального числа итераций, либо требуемого значения целевой функции, а в отдельных случаях применяется дополнительный критерий, основанный на отсутствии заметного улучшения качества решений на протяжении нескольких поколений. Применение механизма элитного наследования и системы терминации обеспечивают устойчивую сходимость алгоритма, что и подтверждает его практическую эффективность для решения сложных многокритериальных задач.

Ещё одним из распространённых и эффективных подходов к решению многокритериальных задач оптимизации является алгоритм роя частиц (PSO) [18], который относится к классу метаэвристических методов, основанных на моделировании коллективного поведения множества взаимодействующих агентов. В отличие от эволюционных алгоритмов, основанных на механизмах наследования и генетической вариативности, PSO использует динамическое обновление состояний частиц на основе индивидуального опыта и коллективной информации, что обеспечивает высокую скорость сходимости и позволяет эффективно исследовать пространство решений [19].

Каждая частица в алгоритме характеризуется позицией $\vec{x}_i(t)$ и скоростью $\vec{v}_i(t)$ в момент времени t , а также сохраняет лучшую найденную позицию p_i^{best} . А также, весь рой отслеживает глобальную квазиоптимальную позицию g_i^{best} . Обновление скорости и позиции частиц осуществляется по классическим рекуррентным выражениям [20]:

$$\vec{v}_i(t+1) = \omega \vec{v}_i + c_1 r_1 (\vec{p}_i^{best} - \vec{x}_i(t)) + c_2 r_2 (\vec{g}_i^{best} - \vec{x}_i(t)), \quad (4)$$

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1),$$

где ω – инерционный коэффициент, регулирующей роль предыдущей скорости; $c_1 c_2$ – когнитивный и социальный коэффициенты; $r_1 r_2 \in [0; 1]$ – случайные числа, обеспечивающие стохастичность поиска. Определение перечисленных коэффициентов задаёт поведение частиц в пространстве поиска, что становится основой для анализа полного цикла работы PSO.

Алгоритм роя частиц основан на механизме коллективного поиска, при котором каждая частица учитывает как собственный опыт, так и информацию о глобально лучшем решении, что обеспечивает характерную для PSO способность к кооперативному (коллективному) обновлению траекторий поиска. В контексте прогнозирования параметров маршрутов процесс оптимизации включает инициализацию роя в допустимых диапазонах параметров, вычисление функции приспособленности для оценки качества текущих решений, обновление локальных и глобальных позиций при улучшении целевой функции, а также корректировку скоростей и координат частиц на основе стандартных рекуррентных соотношений, определяющих их движение к наиболее перспективным областям пространства поиска; завершение итерационного процесса определяется достижением установленного числа шагов, требуемого уровня эффективности либо отсутствием прогресса в глобальном решении. Стохастическая природа и роевой характер поиска обеспечивают PSO высокую скорость сходимости и устойчивость к изменяющимся условиям, однако отсутствие механизмов поддержания разнообразия, характерных, например, для элитного наследования в генетических алгоритмах, может приводить к преждевременной сходимости, что подтверждается результатами вычислительных экспериментов [5, 7, 9].

Вычислительный эксперимент. Для проведения вычислительного эксперимента использовался комплексный подход с применением стандартных и специально разработанных программных средств [8, 13, 18]. В рамках исследования была реализована серия вычислительных экспериментов, направленных на сравнительную оценку эффективности ГА и алгоритма роя частиц. Сравнение выполнялось в идентичных условиях, что гарантировало объективность полученных результатов. Исследование было направлено на

выявление ключевых преимуществ и ограничений каждого из алгоритмов в условиях решения сложных многокритериальных задач планирования полётных траекторий. Для обеспечения объективности анализа разработана программная среда, в которой реализовано несколько экспериментальных сценариев.

Программная среда поддерживает процессы моделирования и анализа четырёх целевых сценариев, каждый из которых отражает отдельный критически важный аспект формирования оптимальной полётной траектории. Сценарий «Time-efficiency» ориентирован на минимизацию общей продолжительности миссии, что определяет время выполнения целевых задач. Сценарий «Shortest-path» предусматривает построение геометрически оптимальной, минимальной по длине траектории, обеспечивающей сокращение суммарного пройденного пути. В сценарии «Weather-adaptivity» исследуется способность алгоритмов снижать влияние неблагоприятных атмосферных факторов – ветровой нагрузки, порывов и осадков – тем самым повышая устойчивость и энергоэффективность полёта. Сценарий «Safety-prioritization» направлен на максимизацию безопасности за счёт стратегического обхода зон потенциального риска и иных опасных участков маршрута.

Для каждого из рассматриваемых сценариев были подготовлены очищенные наборы данных, включающие широкий спектр параметров. В их состав входили три фиксированных значения максимального числа итераций (100, 1000 и 10 000), конфигурации маршрутов, лётно-технические характеристики (высота и скорость полёта), а также метеорологические параметры, такие как температура воздуха, направление, скорость ветра и интенсивность осадков. Структура подготовленных данных обеспечивает возможность их формализованного представления и дальнейшего анализа.

Сформированные экспериментальные наборы данных представлены в форме таблиц 1–4, что обеспечивает их удобство для структурированного анализа и последующей интерпретации. Каждая таблица отражает ключевые параметры сценариев моделирования, включая конфигурационные характеристики маршрутов, численные значения высоты и скорости полёта, метеорологические условия и фиксированные значения числа итераций, что позволяет систематизировать информацию и гарантировать её сопоставимость и валидацию. Формирование каждого датасета осуществляется с учётом требований репрезентативности и статистической устойчивости: варьирование параметров выполняется в пределах допустимых диапазонов, а структура данных поддерживает единообразие для всех сценариев. Такой подход позволяет сформировать статистически корректную и методологически согласованную экспериментальную базу, служащую надёжным основанием для объективного сравнения алгоритмической эффективности ГА и алгоритма PSO в заданных условиях моделирования.

Таблица 1

Режим «time»

Набор данных time_1	Значения
Количество итераций	100
Количество точек	3
Широта точки 1	54,25
Долгота точки 1	54,5
Широта точки 2	54,5
Долгота точки 2	54,25
Широта точки 3	54,5
Долгота точки 3	54,5
Высота полета, м	25
Скорость полета, м\с	10
Температура, С	20
Скорость ветра, м\с	5
Осадки, мм	5

Таблица 2

Режим «shortest»

Набор данных shortest_1	Значения
Количество итераций	100
Количество точек	3
Широта точки 1	54,2
Долгота точки 1	54,7
Широта точки 2	54,7
Долгота точки 2	54,2
Широта точки 3	54
Долгота точки 3	54
Высота полета,м	25
Скорость полета,м/с	10
Температура,С	20
Скорость ветра,м/с	5
Осадки,мм	5

Таблица 3

Режим «distance»

Набор данных distance_1	Значения
Количество итераций	100
Количество точек	3
Широта точки 1	54
Долгота точки 1	55
Широта точки 2	53
Долгота точки 2	54
Широта точки 3	55
Долгота точки 3	53
Высота полета,м	25
Скорость полета,м/с	10
Температура,С	20
Скорость ветра,м/с	5
Осадки,мм	5

Таблица 4

Режим «safety»

Набор данных safety_1	Значения
Количество итераций	100
Количество точек	3
Широта точки 1	54,2
Долгота точки 1	54,7
Широта точки 2	54,7
Долгота точки 2	54,2
Широта точки 3	54
Долгота точки 3	54
Высота полета,м	40
Скорость полета,м/с	10
Температура,С	30
Скорость ветра,м/с	10
Осадки,мм	8

Сформированная структура входных данных определяет дальнейшую логику проведения экспериментов, включая выбор режимов тестирования. Эти режимы не являются произвольными: каждый из них отражает отдельную прикладную задачу, возникающую

при формировании квазиоптимальных траекторий. Режим «time» ориентирован на минимизацию общей длительности полёта; режим «shortest» – на построение геометрически оптимальной и минимальной по длине траектории; режим «distance» – на снижение негативного влияния метеорологических факторов, прежде всего ветровой нагрузки; режим «safety» – на максимальное избегание зон повышенного риска. Подготовленные наборы данных служат основой для проведения сравнительного анализа в каждом из режимов требует определения набора объективных метрик, по которым оценивается качество решений.

Оценка эффективности работы алгоритмов выполняется на основе набора выбранных метрик, обеспечивающих качество формируемых решений. К таким метрикам относятся: интегральный показатель качества решения «fitness_score», уровень энергопотребления «battery_consume», индикатор потенциального риска «safety_risk» и итоговое значение целевой функции «final_fitness», фиксируемое после завершения алгоритма. Совокупность указанных метрик позволяет получить целостную и объективную оценку работы алгоритмов, охватывая ключевые аспекты их производительности и практической применимости в условиях реальной эксплуатации. Отметим, что полученные результаты в рамках вычислительного эксперимента измеряются в условных единицах.

Результаты вычислительного эксперимента представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты вычислительного эксперимента

Наборы данных	fitness_score		battery_consume		safety_risk		final_fitness	
	GA	PSO	GA	PSO	GA	PSO	GA	PSO
time_1	0,7883	0,5996	79,17	47,86	0,6	0,4	0,87587	0,7698
time_2	0,8905	0,6003	63,26	51,28	0,6	0,4	0,9133	0,7701
time_3	0,8979	0,5137	49,41	62,59	0,5	0,4	0,9493	0,7311
short_1	0,7462	0,6	100	100	0,6	0,4	0,9089	0,77
short_2	0,8249	0,6	100	100	0,6	0,4	0,9305	0,77
short_3	0,8781	0,607	100	100	0,6	0,4	0,9485	0,7731
distance_1	0,8137	0,5972	100	100	0,6	0,4	0,9278	0,7687
distance_2	0,8642	0,6042	100	100	0,6	0,4	0,9416	0,7719
distance_3	0,8642	0,6008	100	100	0,6	0,4	0,9408	0,7703
safety_1	0,6377	0,6039	100	100	0,95	0,95	0,8914	0,7717
safety_2	0,7303	0,6054	100	100	0,95	0,95	0,9065	0,7724
safety_3	0,7377	0,6093	100	100	0,95	0,95	0,9045	0,7741

Анализ представленных данных показывает, что генетический алгоритм демонстрирует более высокие значения интегральных метрик качества (fitness_score и final_fitness) на всех тестовых наборах. Алгоритм роя частиц характеризуется большей вариативностью результатов и уступает ГА по значению целевой функции, что указывает на ограниченную способность PSO к последовательному улучшению решений в сложных сценариях. При этом показатели энергопотребления и риска остаются сопоставимыми, что подтверждает корректность условий сравнения и позволяет сделать вывод, что различия обусловлены именно особенностями поисковой динамики. Совокупность результатов подтверждает высокую эффективность и устойчивость ГА в задаче параметрического прогнозирования траекторий. Полученные численные показатели дополняются графической интерпретацией, позволяющей продемонстрировать особенности поведения данных алгоритмов в работе по различным сценариям.

Результаты моделирования представлены на рис. 1 и 2. Каждый из них демонстрирует характерные особенности построения траекторий при использовании различных критериев. На рис. 1 представлена траектория, сформированная в рамках сценария «Shortest-path», в котором основным критерием является геометрическая протяжённость маршрута.

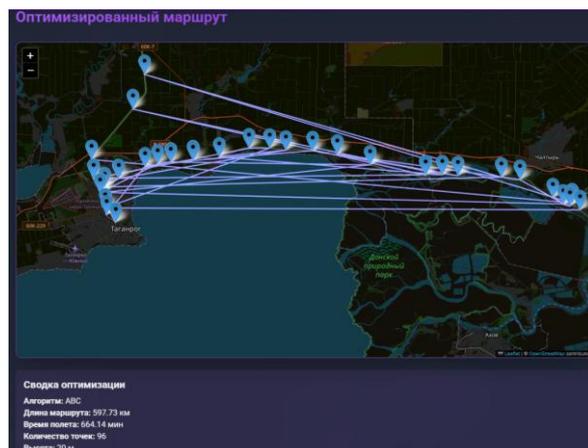


Рис. 1. Кратчайший маршрут

В данном режиме приоритет отдаётся исключительно геометрической оптимальности – минимизации длины пути. При этом алгоритм формирует максимально прямолинейную и компактную траекторию без дополнительных обходов и отклонений, возникающих при отсутствии жёстких ограничений по риску, метеорологическим параметрам или энергетическим требованиям.

Представленная конфигурация отражает эталонный вариант решения, применимый в условиях, когда длина пути является основным критерием. Такая траектория служит базовым ориентиром для сопоставления с другими сценариями, в которых в процессе поиска учитываются дополнительные требования, такие как устойчивость к метеофакторам, минимизация рисков или балансировка нескольких критериев. Визуализированный маршрут отражает особенности работы гибридного алгоритма в режиме, ориентированном на пространственную экономию.

На рис. 2 представлена траектория, оптимизированная по критерию безопасности. Маршрут отражает оптимальный обход потенциально опасных областей, а минимизация вероятности пересечения зон повышенного риска приводит к обоснованному отклонению траектории от прямой линии между ключевыми точками.

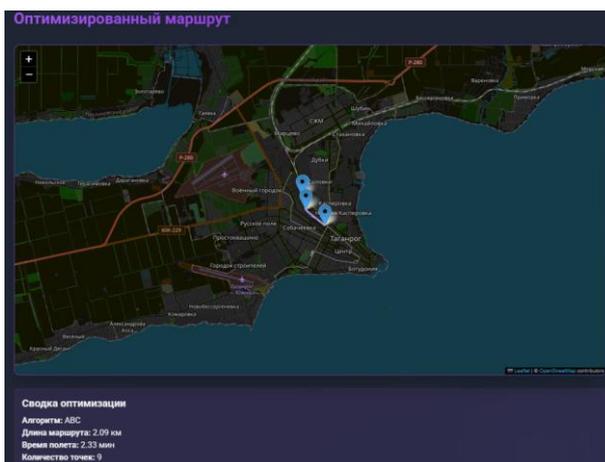


Рис. 2. Безопасный маршрут

Полученная траектория демонстрирует сбалансированное соотношение между увеличением длины пути и снижением интегрального риска: маршрут приобретает более плавную форму, избегая критические зоны для поддержания стабильных условий полёта.

Такое решение отражает приоритет безопасных требований над геометрическими и временными критериями, что особенно важно при выполнении задач в условиях неопределённости или повышенных эксплуатационных ограничениях.

На рис. 3 представлена динамика изменения целевой функции, позволяющая сравнить характер сходимости двух оптимизационных алгоритмов.

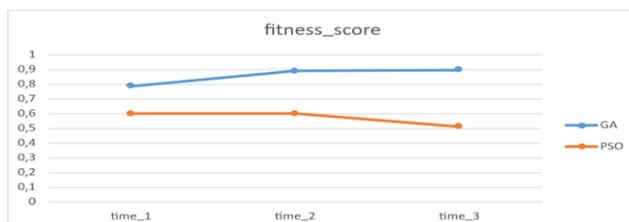


Рис. 3. Динамика изменения целевой функции

Анализ кривых сходимости показывает существенные различия в поведении алгоритмов. Генетический алгоритм демонстрирует устойчивое и последовательное улучшение значения целевой функции, тогда как PSO проявляет высокую вариативность и чувствительность к стохастическим компонентам. Это выражается в стабильном приближении ГА к квазиоптимальному решению, в то время как PSO часто фиксируется в локальных экстремумах и не обеспечивает монотонного улучшения результата. Динамика показателя *final_fitness* дополнительно подтверждает преимущество ГА как более эффективной поисковой стратегии для рассматриваемой задачи.

Заключение. В ходе исследования рассмотрена задача параметрического прогнозирования и оптимизации траектории движения БАС, актуальность которой обусловлена высокой динамичностью полётной среды и необходимостью повышения точности выбора траекторных параметров в условиях неопределённости. Проведён анализ эволюционных методов и алгоритмов машинного обучения, позволивший определить их особенности и применимость в многокритериальных задачах оптимизации полёта.

На основе интеграции генетического алгоритма с моделью XGBoost разработан комбинированный подход, обеспечивающий адаптивную оценку качества решений и улучшенную динамику сходимости. На основе разработанных методов и механизмов реализован программный комплекс, который включает механизмы селекции, рекомбинации, мутации и элитного наследования, а также модуль машинного обучения для валидации траекторных параметров.

Проведённый вычислительный эксперимент, охватывающий четыре практических сценария («time», «shortest», «distance», «safety») и три уровня глубины оптимизации (100, 1000 и 10 000 итераций), продемонстрировал выраженное преимущество генетического алгоритма по сравнению с PSO. В частности, повышение качества проектных решений составило 14–17%, что отражено в более высоких значениях «fitness_score» и «final_fitness», а также в стабильной динамике сходимости. Генетический алгоритм показал устойчивость к локальным экстремумам и способность к последовательному улучшению результата на всех итерациях алгоритма, тогда как PSO продемонстрировал менее устойчивую траекторию поиска.

Полученные результаты демонстрируют практическую значимость предложенного подхода и подтверждают его эффективность в задачах прогнозирования и оптимизации траекторных параметров БАС. Гибридизация эволюционных методов и алгоритмов машинного обучения обеспечивает повышение точности прогнозов и устойчивость к вариативности входных данных, что расширяет возможности их применения в инженерных и эксплуатационных сценариях автономного управления беспилотными системами. Дальнейшее развитие исследования может быть связано с расширением набора критериев оценки качества и эффективности проектных решений, внедрением динамических моделей среды и созданием гибридных архитектур с использованием нейросетевых систем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 24-71-00035, <https://rscf.ru/project/24-71-00035/> в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курейчик В.В., Гладков Л.А., Кравченко Ю.А., Родзин С.И. Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации: монография. – Чебоксары: Издательский дом «Среда», 2024. – 228 с. – ISBN 978-5-907830-56-1. – DOI: 10.31483/a-10639.
2. Курейчик В.В., Родзин С.И. Вычислительные модели эволюционных и роевых биоэвристик (обзор) // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, № 10. – С. 507-520. – DOI: 10.17587/it.27.507-520.
3. Курейчик В.В., Данильченко В.И., Данильченко Е.В. Маршрутизация автономных устройств в трёхмерном пространстве // Информатика и автоматизация. – 2025. – Т. 24, № 2. – С. 492-525. – DOI 10.15622/ia.24.2.5.
4. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновлённые природой. – 3-е изд. – М.: МГТУ им. Баумана, 2021. – 448 с.
5. Гладков Л.А., Гладкова Н.В. Эволюционирующие многоагентные системы и эволюционное проектирование // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4 (214). – С. 48-59. – DOI: 10.18522/2311-3103-2020-4-48-59.
6. Семенов Н.А., Иванов В.К., Думина Д.С. Определение весовых коэффициентов для аддитивной фитнес-функции генетического алгоритма // Программные продукты и системы. – 2020. – № 1. – С. 47-53.
7. Тарасов В.Б., Гладков Л.А., Лейба С.Н. Разработка и программная реализация гибридного алгоритма решения оптимизационных задач автоматизированного проектирования // Программные продукты и системы. – 2018. – № 3. – С. 569-580.
8. Кулиев Э.В., Лежебоков А.А., Семенова М.М., Семенов В.А. Подход к кодированию решений в эволюционных методах для создания инструментальной платформы проектирования // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 2 (212). – С. 169-179.
9. Казакова Е.М. Применение метода роя частиц в задачах оптимизации // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2022. – № 5 (109). – С. 48-57. – DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-48-57.
10. Рачков Т.И., Кузьмина И.А. Мета-эвристический алгоритм децентрализованного управления группой // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 3. – С. 96-99. – DOI 10.52348/2712-8873_ММТТ_2021_3_96.
11. Костин А.С., Майоров Н.Н. Исследование моделей и методов маршрутизации и практического выполнения автономного движения беспилотными транспортными системами для доставки грузов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2023. – Т. 15, № 3. – С. 524-536. – DOI 10.21821/2309-5180-2023-15-3-524-536.
12. Акопов А.С., Бекларян Л.А., Бекларян А.Л. Оптимизация характеристик интеллектуальной транспортной системы с использованием генетического алгоритма вещественного кодирования на основе адаптивной мутации // Информационные технологии. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 115-125. – DOI 10.17587/it.29.115-125.
13. De Souza L.A.M., Da Silva J.E.H., Chaves L.J., Bernardino H.S. A benchmark suite for designing combinational logic circuits via metaheuristics // Applied Soft Computing. – 2020. – Vol. 91. – P. 1-32.
14. Hemmak A. Optimal adjusting of simulated annealing parameters // Military Technical Courier. – 2024. – Vol. 72, No. 1. – P. 80-93.
15. Костюков В.А., Медведев М.Ю., Пишихов В.Х. Метод оптимизации траектории мобильного робота в поле источников-репеллеров // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т. 20, № 3. – С. 690-726. – DOI 10.15622/ia.2021.3.7.
16. Литвиненко А.М., Кудрявцев Г.В., Ибрагимов М.У.У. Исследование адаптивной системы управления электроэнергетическим комплексом с ветроэлектрогенератором // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2021. – № 3 (65). – С. 10-17. – DOI 10.53015/18159958_2021_3_10.
17. Курочкин А.Г., Тютенко Е.А. Модифицированный алгоритм сглаживания точек маршрута // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2016. – № 5 (68). – С. 43-51.
18. Шмалько Е.Ю., Румянцев Ю.А., Байназаров Р.Р., Ямианов К.Л. Идентификация нейросетевой модели робота для решения задачи оптимального управления // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т. 20, № 6. – С. 1254-1278. – DOI 10.15622/ia.20.6.3.
19. Кензин М.Ю., Бычков И.В., Максимкин Н.Н. Комплексный многоцелевой мониторинг группой автономных транспортных средств // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 7 (209). – С. 82-92. – DOI 10.23683/2311-3103-2019-7-82-92.
20. Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования пути // Тр. ИСП РАН. – 2016. – Т. 28, № 4. – С. 241-294.

REFERENCES

1. Kureychik V.V., Gladkov L.A., Kravchenko Yu.A., Rodzin S.I. *Intellektual'nye sistemy: modeli i metody metaevristicheskoy optimizatsii: monografiya* [Intelligent systems: models and methods of metaheuristic optimization: monograph]. Cheboksary: Izdatel'skiy dom «Sreda», 2024, 228 s. ISBN 978-5-907830-56-1. – DOI: 10.31483/a-10639.
2. Kureychik V.V., Rodzin S.I. Vychislitel'nye modeli evolyutsionnykh i roevykh bioevristik (obzor) [Computational models of evolutionary and swarm bioheuristics: a review], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2021, Vol. 27, No. 10, pp. 507-520. DOI: 10.17587/it.27.507-520.
3. Kureychik V.V., Danil'chenko V.I., Danil'chenko E.V. Marshrutizatsiya avtonomnykh ustroystv v trekhmernom prostranstve [Routing of autonomous devices in three-dimensional space], *Informatika i avtomatizatsiya* [Informatics and Automation], 2025, Vol. 24, No. 2, pp. 492-525. DOI 10.15622/ia.24.2.5.
4. Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy* [Modern algorithms of search optimization: algorithms inspired by nature]. 3rd ed. Moscow: MG TU im. Baumana, 2021, 448 p.
5. Gladkov L.A., Gladkova N.V. Evolyutsioniruyushchie mnogoagentnye sistemy i evolyutsionnoe proektirovanie [Evolving multi-agent systems and evolutionary design], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 4 (214), pp. 48-59. DOI: 10.18522/2311-3103-2020-4-48-59.
6. Semenov N.A., Ivanov V.K., Dumina D.S. Opredelenie vesovykh koefitsientov dlya additivnoy fitnes-funktsii geneticheskogo algoritma [Determining weight coefficients for an additive fitness function of a genetic algorithm], *Programmnye produkty i sistemy* [Software Products and Systems], 2020, No. 1, pp. 47-53.
7. Tarasov V.B., Gladkov L.A., Leyba S.N. Razrabotka i programmaya realizatsiya gibridnogo algoritma resheniya optimizatsionnykh zadach avtomatizirovannogo proektirovaniya [Development and software implementation of a hybrid algorithm for solving optimization problems in automated design], *Programmnye produkty i sistemy* [Software Products and Systems], 2018, No. 3, pp. 569-580.
8. Kuliev E.V., Lezhebokov A.A., Semenova M.M., Semenov V.A. Podkhod k kodirovaniyu resheniy v evolyutsionnykh metodakh dlya sozdaniya instrumental'noy platformy proektirovaniya [An approach to solution encoding in evolutionary methods for instrumental design platforms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 2 (212), pp. 169-179.
9. Kazakova E.M. Primenenie metoda roya chastits v zadachakh optimizatsii [Application of the particle swarm optimization method in optimization problems], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS], 2022, No. 5 (109), pp. 48-57. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-48-57.
10. Rakhov T.I., Kuz'mina I.A. Meta-evristicheskiy algoritm detsentralizovannogo upravleniya gruppoy [A meta-heuristic algorithm for decentralized group control], *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical Methods in Techniques and Technology], 2021, No. 3, pp. 96-99. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_3_96.
11. Kostin A.S., Mayorov N.N. Issledovanie modeley i metodov marshrutizatsii i prakticheskogo vypolneniya avtonomnogo dvizheniya bespilotnymi transportnymi sistemami dlya dostavki gruzov [Study of models and methods of routing and autonomous navigation of unmanned transport systems for cargo delivery], *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova* [Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping], 2023, Vol. 15, No. 3, pp. 524-536. DOI 10.21821/2309-5180-2023-15-3-524-536.
12. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Beklaryan A.L. Optimizatsiya kharakteristik intellektual'noy transportnoy sistemy s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma veshchestvennogo kodirovaniya na osnove adaptivnoy mutatsii [Optimization of intelligent transport system characteristics using a real-coded genetic algorithm with adaptive mutation], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2023, Vol. 29, No. 3, pp. 115-125. DOI 10.17587/it.29.115-125.
13. De Souza L.A.M., Da Silva J.E.H., Chaves L.J., Bernardino H.S. A benchmark suite for designing combinational logic circuits via metaheuristics, *Applied Soft Computing*, 2020, Vol. 91, pp. 1-32.
14. Hemmak A. Optimal adjusting of simulated annealing parameters, *Military Technical Courier*, 2024, Vol. 72, No. 1, pp. 80-93.
15. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh. Metod optimizatsii traektorii mobil'nogo robota v pole istochnikov-repellerov [Trajectory optimization of a mobile robot in a field of repelling sources], *Informatika i avtomatizatsiya* [Informatics and Automation], 2021, Vol. 20, No. 3, pp. 690-726. DOI 10.15622/ia.2021.3.7.
16. Litvinenko A.M., Kudryavtsev G.V., Ibragimov M.U.U. Issledovanie adaptivnoy sistemy upravleniya elektroenergeticheskim kompleksom s vetroelektrogeneratorom [Study of an adaptive control system for an electric-power complex with a wind generator], *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya* [Vestnik of Higher Educational Institutions of the Black Earth Region], 2021, No. 3 (65), pp. 10-17. DOI 10.53015/18159958_2021_3_10.

17. Kurochkin A.G., Titenko E.A. Modifitsirovannyu algoritm sglazhivaniya toчек маршрута [Modified algorithm for smoothing route points], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya of the Southwest State University], 2016, No. 5 (68), pp. 43-51.
18. Shmal'ko E.Yu., Rummyantsev Yu.A., Baynazarov R.R., Yamshanov K.L. Identifikatsiya neyrosetevoy modeli robota dlya resheniya zadachi optimal'nogo upravleniya [Identification of a neural network model of a robot for solving optimal control problems], *Informatika i avtomatizatsiya* [Informatics and Automation], 2021, Vol. 20, No. 6, pp. 1254-1278. DOI 10.15622/ia.20.6.3.
19. Kenzin M.Yu., Bychkov I.V., Maksimkin N.N. Kompleksnyu mnogotsel'evoy monitoring gruppy avtonomnykh transportnykh sredstv [Integrated multi-purpose monitoring by a group of autonomous vehicles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 7 (209), pp. 82-92. DOI 10.23683/2311-3103-2019-7-82-92.
20. Kazakov K.A., Semenov V.A. Obzor sovremennykh metodov planirovaniya puti [Review of modern path planning methods], *Tr. ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2016, Vol. 28, No. 4, pp. 241-294.

Данильченко Владислав Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: vdanielchenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; доцент.

Бова Виктория Викторовна – Южный федеральный университет; e-mail: vbova@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия, тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; доцент.

Danilchenko Vladislav Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: vdanielchenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; V.M. Kureichik Computer-Aided Design Systems Department; associate professor.

Bova Victoria Viktorovna – Southern Federal University; e-mail: vbova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; V.M. Kureichik Computer-Aided Design Systems Department; associate professor.

УДК 519.711

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-276-287

Б.А. Комаров, С.В. Леонов, Т.Е. Мамонова

НЕЙРОСЕТЕВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Актуальность. При решении задач стабилизации динамических объектов достаточно широко применяется классическое модельно-прогнозирующее управление. Оно обеспечивает высокое качество управления за счёт решения задачи оптимизации на каждом шаге, однако обладает значительными вычислительными затратами, что ограничивает его применение в системах реального времени с высокими требованиями к частоте обновления. Поэтому вопрос исследования применимости нейросетевого регулятора, обученного на модельно-прогнозирующем регуляторе (МРС) при решении задачи стабилизации положения динамического объекта при ограниченном вычислительном и временном ресурсе является актуальной. **Цель.** Целью представленной работы было разработать и исследовать нейросетевой регулятор, обученный на основе МРС-регулятора, для стабилизации положения динамического объекта на подвижной платформе. **Методы.** При выполнении работы использовались методы системного анализа, имитационного моделирования, а также экспериментальные испытания на стенде. **Результаты и выводы.** В рамках исследования разработан и обучен нейросетевой регулятор, аппроксимирующий поведение МРС на основе данных, полученных при управлении реальной балансировочной платформой. Обучение проводилось по входным и выходным данным МРС без использования внутренней модели системы, что позволило воспроизвести динамику регулятора при существенно меньших вычислительных затратах. Экспериментальные результаты показали, что нейросетевая модель обеспечивает качество стабилизации, сопоставимое с оригинальным МРС, при этом время вычислений сократилось с 47 мс до 1.6 мс, что составило значение ускорения в 29 раз. Предложенный подход демонстрирует потенциал нейросетевых методов управления в задачах замещения сложных оптимизационных регуляторов для систем с ограниченными вычислительными ресурсами.

Нейросетевой регулятор; модельно-прогнозирующее управление (МРС); стабилизация положения; балансировочная платформа; аппроксимация МРС; оптимизация управления.

B.A. Komarov, S.V. Leonov, T.E. Mamonova

NEURAL NETWORK APPROXIMATION OF MODEL-PREDICTIVE CONTROL FOR A DYNAMIC OBJECT STABILIZATION SYSTEM

Relevance. When solving problems of stabilization of dynamic objects, classical model predictive control is widely used. It provides high quality control by solving the optimization problem at each step, but it has significant computing costs, which limits its application in real-time systems with high requirements for update frequency. Therefore, the question of investigating the applicability of a neural network regulator trained on a model predictive regulator (MPC) when solving the problem of stabilizing the position of a dynamic object with a limited computational and time resource is relevant. **Goal.** The purpose of the presented work was to develop and study a neural network regulator trained on the basis of an MPC regulator to stabilize the position of a dynamic object on a mobile platform. **Methods.** When performing the work, methods of system analysis, simulation modeling, as well as experimental tests on the bench were used. **Results and conclusions.** As part of the study, a neural network regulator was developed and trained that approximates the behavior of MPC based on data obtained when controlling a real balancing platform. The training was conducted on the input and output data of the MPC without using the internal model of the system, which made it possible to reproduce the dynamics of the regulator at significantly lower computational costs. Experimental results showed that the neural network model provides a stabilization quality comparable to the original MPC, while the calculation time was reduced from 47 ms to 1.6 ms, which amounted to an acceleration value of 29 times. The proposed approach demonstrates the potential of neural network control methods in the problems of replacing complex optimization regulators for systems with limited computing resources.

Neural network regulator; model predictive control (MPC); position stabilization; balancing platform; MPC approximation; management optimization.

Введение. В настоящее время проблема стабилизации динамических объектов является одной из самых важных при проектировании и эксплуатации технических устройств специального назначения, работающих в неопределенных заранее условиях с ограничением временных и вычислительных ресурсов [1–3].

Модельно-прогнозирующее управление (МРС) является одним из наиболее эффективных подходов современной теории управления, позволяющим учитывать ограничения на управление и прогнозировать поведение системы на горизонте предсказания [4–8]. Тем не менее, основным недостатком МРС заключается в высокой вычислительной сложности: на каждом шаге требуется решать задачу оптимизации, что приводит к значительным временным затратам. Это ограничивает применение МРС в системах реального времени, особенно для объектов с высокой частотой дискретизации [9].

Для снижения вычислительных затрат активно исследуются подходы, основанные на замещении МРС-регулятора нейросетевыми моделями [10–17]. В таких работах нейросеть обучается воспроизводить поведение МРС, фактически заменяя процесс онлайн-оптимизации на прямой вызов аппроксиматора. Подобные методы демонстрируют ускорение в десятки раз при минимальной потере качества управления. Однако большинство исследований проводилось на симулированных данных и для упрощенных моделей систем. Реальное применение таких регуляторов на физических установках остаётся ограниченным.

Настоящая работа посвящена исследованию применения нейросетевого аппроксиматора МРС в задаче стабилизации шарика на подвижной платформе – классической линейной системы с элементами стохастического поведения. В отличие от большинства известных исследований, обучение нейросети проводилось на экспериментальном стенде и его реальной модели, с использованием только входных и выходных данных МРС-регулятора без доступа к внутренним параметрам модели.

Целью представленной работы было разработать и исследовать нейросетевой регулятор, обученный на основе МРС-регулятора, для стабилизации положения динамического объекта на подвижной платформе.

Основные задачи работы:

- 1) разработка и реализация МРС-регулятора для реальной балансировочной платформе;
- 2) обучение нейросети- на основе данных, собранных с физического стенда;
- 3) экспериментальное сравнение качества регулирования.

Для оценки результатов работы исследуемых регуляторов использован классический ПИД-регулятор, вычисляющий управляющее воздействие как комбинацию пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ошибки:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} + u_{\text{bias}},$$

где $e(t) = r(t) - y(t)$ – ошибка между уставкой и текущим значением выхода системы, K_p, K_i, K_d – коэффициенты регулятора, а u_{bias} – смещение. Для уменьшения влияния шума применялось экспоненциальное сглаживание текущего значения. Управляющее воздействие ограничивалось в пределах допустимого диапазона привода.

Описание экспериментального стенда и методика испытаний.

Экспериментальный стенд на рис. 1 включает сервопривод, на оси которого закреплена балка квадратного сечения. По поверхности балки свободно перемещается динамический объект – шарик. Положение шарика в реальном времени фиксируется видеокamerой, установленной сверху. Сигнал с камеры обрабатывается компьютером, который формирует управляющее воздействие для сервопривода, замыкая контур управления.



Рис. 1. Экспериментальная установка

Математическая модель объекта управления описана с учётом силы тяжести F_T , силы реакции опоры N , силы трения качения $F_{\text{тр}}$, и момента инерции I . Ускорение шара определяется как:

$$a = \frac{5}{7} \cdot g \cdot \sin(\theta),$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; θ – угол наклона поверхности, град; a – ускорение шара, м/с^2 .

Динамика сервопривода аппроксимирована апериодическим звеном первого порядка:

$$W(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1},$$

где K – коэффициент передачи; T – постоянная времени.

Таким образом, результирующая передаточная функция для нахождения координат шара:

$$W(s) = \frac{K_{\text{рез}}}{s^2 \cdot (T \cdot s + 1)},$$

где $K_{\text{рез}}$ – результирующий коэффициент передачи, равный:

$$K_{\text{рез}} = K \cdot \frac{5}{7} \cdot g \cdot \sin(\theta),$$

Параметры модели ($K_{\text{рез}} = 0.79$, $T = 0.22$) были идентифицированы с использованием метода наименьших квадратов по экспериментальным данным.

В уравнениях состояния в дискретной форме с шагом дискретизации 0.1 с модель объекта системы имеет вид:

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 & 0 \\ 0 & 1 & -0.079 \\ 0 & 0 & 0.5455 \end{bmatrix} \cdot x_k + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.4545 \end{bmatrix} \cdot u_k$$

$$y_k = [1 \ 0 \ 0] \cdot x_k$$

Для оценки эффективности регуляторов проводилось тестирование в идентичных условиях. В систему подавались одинаковые ступенчатые сигналы уставки с фиксированной амплитудой и длительностью. Управляющие алгоритмы работали в режиме стабилизации, т.е. задача заключалась в перемещении и удержании шарика вблизи заданной координаты при изменении уставки. Исследуемые системы с тремя типами регуляторов (ПИД, модельно-прогнозирующий и нейросетевой) настроены на показатели качества, удовлетворяющие условиям: перерегулирование σ – не более 5 %; время переходного процесса h_{st} – не более 3 с; статическая ошибка ε – не более 5 мм.

На первом шаге для сравнительного анализа эффективности алгоритмов управления были получены переходные характеристики системы с ПИД-регулятором. На рис. 2 проиллюстрированы графики координаты шара от времени, которые наглядно демонстрируют разницу в качестве управления.

ПИД-регулятор на рис. 2 обеспечивает колебательный переходный процесс с значительным перерегулированием. Система длительное время не может выйти на установившийся режим, что свидетельствует о недостаточной демпфирующей способности этого способа управления динамическим объектом. Параметры ПИД-регулятора: пропорциональная составляющая $K_p = 4$; интегральная составляющая $K_i = 0.001$; дифференциальная составляющая $K_d = 4$.

На рис. 3 приведен график изменения угла оси электропривода, отражающий характер управляющих сигналов, вырабатываемых ПИД-регулятором.

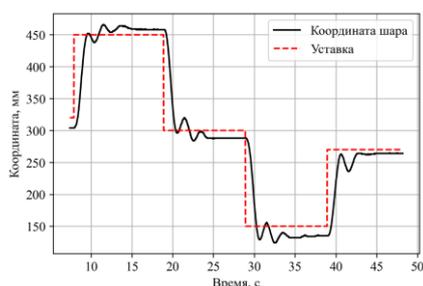


Рис. 2. Переходная характеристика системы с ПИД-регулятором

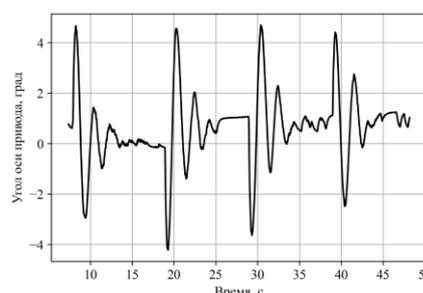


Рис. 3. Угол привода при управлении ПИД-регулятором

Для ПИД-регулятора характерно реактивное управление, при котором резкие изменения угла положения возникают как запоздавшая реакция на отклонение шарика. Это приводит к «перелётам» через положение уставки и последующим колебаниям системы по управлению.

Алгоритм модельно-прогнозирующего управления с учётом задержки и расширенных состояний. Принцип MPC регулирования заключается в том, что на каждом шаге дискретного времени формируется оптимальная последовательность управляющих воздействий, минимизирующая функцию стоимости при учёте ограничений на состояние и управление. На объект подаётся только первое управление из найденной последовательности, после чего процесс повторяется с обновлённым состоянием системы [18].

В общем случае динамика объекта описывается линейной дискретной моделью:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, y_k = Cx_k,$$

где $x_k \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния; $u_k \in \mathbb{R}^m$ – управляющее воздействие; $y_k \in \mathbb{R}^p$ – выход системы; A, B, C – матрицы состояния, управления и выхода соответственно.

На каждом шаге времени k прогнозируется поведение системы на горизонте N шагов вперёд:

$$\hat{x}_{k+i+1|k} = A\hat{x}_{k+i|k} + Bu_{k+i|k}, i = 0, 1, \dots, N - 1,$$

В классическом MPC цель управления формулируется через функцию стоимости, минимизация которой определяет оптимальную последовательность управляющих воздействий на горизонте предсказания. Функция стоимости отражает компромисс между точностью слежения за заданной траекторией и величиной управляющих воздействий.

Для линейной дискретной системы в пространстве состояний функция стоимости на горизонте N записывается в виде квадратичного функционала:

$$J(\mathbf{U}; x_k) = \sum_{i=0}^{N-1} [(\hat{x}_{k+i|k} - r_{k+i})^T Q(\hat{x}_{k+i|k} - r_{k+i}) + u_{k+i|k}^T R u_{k+i|k}]$$

где $\hat{x}_{k+i|k}$ – прогноз состояния на шаге $k + i$, сделанный в момент времени k ; r_{k+i} – опорная траектория для состояния; $u_{k+i|k}$ – прогнозируемое управляющее воздействие; Q – весовая матрица для отклонений состояния (определяет, насколько важно минимизировать отклонение каждого состояния от заданной траектории); R – весовая матрица для управляющих воздействий (штрафует величину управляющих воздействий, позволяя настроить характер управления) [19–20].

Таким образом, функция стоимости выполняет несколько взаимосвязанных задач. Во-первых, она непосредственно измеряет отклонение прогнозируемого состояния системы от заданной опорной траектории и одновременно учитывает величину управляющих воздействий, что позволяет регулировать компромисс между точностью слежения и усилиями управления. Во-вторых, через весовые матрицы Q и R реализуется гибкая настройка приоритетов: можно сделать акцент на контроле наиболее критичных переменных состояния или, наоборот, ограничить нагрузку на исполнительные механизмы.

В классическом MPC предполагается, что управляющее воздействие подаётся на систему без задержек. Однако в реальных системах часто присутствует аperiодическое запаздывание управления, например, из-за задержки передачи сигнала, ограничений привода или времени реакции исполнительного механизма. Для корректного учёта таких задержек был применён подход с расширенными матрицами состояния и буфером управления, что позволяет включить известные уже поданные воздействия в алгоритм оптимизации.

Если задержка управления составляет d дискретных шагов, то вектор состояния системы можно расширить, включив в него последние d управляющих воздействий:

$$x_k^{aug} = \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \\ u_{k-2} \\ \dots \\ u_{k-d} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n+d-m},$$

где $x_k \in \mathbb{R}^n$ – исходное состояние системы, $u_{k-i} \in \mathbb{R}^m$ – уже поданные управления.

Расширенные матрицы системы формулируются так, чтобы в составе линейной дискретной динамики учитывались эти прошлые воздействия:

$$x_{k+1}^{aug} = A_{aug}x_k^{aug} + B_{aug}u_k,$$

Далее на каждом шаге времени прогнозируется поведение расширенной системы на горизонте планирования N шагов вперёд:

$$\hat{x}_{k+i+1|k}^{aug} = A_{aug}\hat{x}_{k+i|k}^{aug} + B_{aug}u_{k+i|k}, i = 0, 1, \dots, N - 1.$$

где

$$A_{aug} = \begin{bmatrix} A & B & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & I & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & I \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, B_{aug} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I \end{bmatrix}.$$

Функция стоимости формулируется аналогично классическому MPC-регулятору, но теперь с использованием расширенного состояния:

$$J(\mathbf{U}; x_k^{aug}) = \sum_{i=0}^{N-1} [(\hat{x}_{k+i|k}^{aug} - r_{k+i})^T Q_{aug} (\hat{x}_{k+i|k}^{aug} - r_{k+i}) + u_{k+i|k}^T R u_{k+i|k}],$$

где Q_{aug} – расширенная весовая матрица, включающая приоритеты для состояния системы.

Буфер управления, состоящий из последних d уже поданных воздействий, формирует начальные значения для расширенного состояния x_k^{aug} . Таким образом, первые шаги горизонта не оптимизируются, так как они уже реализованы через буфер, а оптимизация выполняется только по будущим управляющим воздействиям. В итоге, на каждом шаге управления решаются следующие задачи:

- ◆ этап 1 – формируется расширенный вектор состояния:
 $x = [x_k, u_{k-1}, u_{k-2}, \dots, u_{k-d}]^T$;
- ◆ этап 2 – выполняется оптимизация с учётом уже применённых, но ещё не реализованных воздействий;
- ◆ этап 3 – в физическую систему подаётся только первое управляющее воздействие из оптимальной последовательности;
- ◆ этап 4 – буфер MPC-регулятора обновляется добавлением нового управления.

На каждом шаге работы MPC решается задача квадратичной оптимизации [18]:

$$\min_U \sum_{k=0}^{N-d-1} (x_k - r_{k+d})^T Q (x_k - r_{k+d}) + u_k^T R u_k,$$

при условиях:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, x_0 = x_{init}, u_{min} \leq u_k \leq u_{max},$$

где N – горизонт предсказания; Q и R – матрица весов для состояния и управления; r_k – опорная траектория (установка); u_{min} , u_{max} – ограничения на управляющее воздействие [21–25].

Таким образом, MPC с учётом задержки сохраняет преимущества классического предсказательного управления, одновременно корректно учитывая физическую задержку исполнительных механизмов, что повышает точность и стабильность управления. Тем не менее, как и утверждалось ранее – основной недостаток MPC заключается в высокой вычислительной сложности. И, в случае решения задач управления многосвязными динамическими объектами к аппаратной части предъявляются повышенные требования.

Для сравнительного анализа эффективности алгоритмов управления были получены переходные характеристики системы по каналу положения динамического объекта, изображённые на рис. 4.

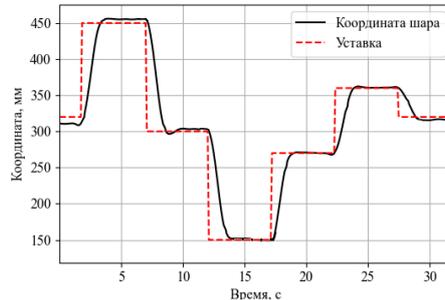


Рис. 4. Переходные характеристики системы с прогнозирующим регулятором

MPC-регулятор на рис. 4 обеспечивает аperiodический переходный процесс с плавным выходом на заданное значение. Отсутствие колебаний указывает на эффективную компенсацию инерционности объекта и запаздываний в системе. Для оценки производи-

тельности регуляторов проведен количественный анализ ключевых метрик, представленный в табл. 1. Данные табл. 1 подтверждают преимущество MPC-регулятора по всем показателям качества. Время переходного процесса сокращено в 2 раза, статическая ошибка уменьшена более чем в 2 раза, при этом перерегулирование полностью устранено.

Таблица 1

Сравнительные показатели качества управления

Показатель качества	ПИД-регулятор	MPC-регулятор
Перерегулирование, %	18.5	0.0
Время переходного процесса, с	3.87	1.95
Статическая ошибка, мм	10.5	4.75

На рис. 5 приведен график изменения угла оси электропривода, отражающий характер управляющих сигналов, вырабатываемых MPC-регулятором. В этом случае система работает упреждающе, на основе прогноза динамики он формирует оптимальные управляющие воздействия до появления значительного рассогласования. В целом, данное управление более точное и направленное, без лишних колебаний и с меньшими затратами энергии.

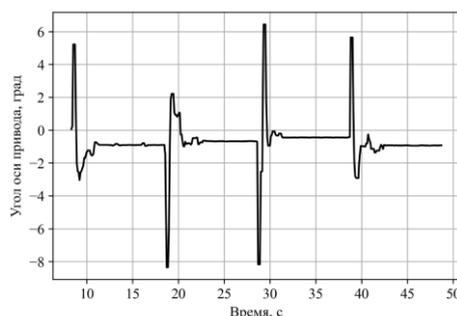


Рис. 5. Угол привода при управлении MPC-регулятором

Проведённое исследование демонстрирует значительное преимущество модельно-прогнозирующего регулятора (MPC) перед классическим ПИД-регулятором в задаче стабилизации линейного объекта с запаздыванием. Количественные результаты подтверждают, что MPC обеспечил апериодический переходный процесс с полным отсутствием перерегулирования, сократил время переходного процесса в 2 раза (с 3.87 с до 1.95 с) и снизил статическую ошибку более чем в 2 раза (с 10.5 мм до 4.75 мм).

Предложенный подход с буфером управляющих воздействий в MPC позволил эффективно компенсировать программные и механические запаздывания, что недостижимо для реактивного ПИД-управления. MPC обеспечивает не только более высокую точность, но и повышает плавное, энергоэффективное управление за счёт упреждающего прогнозирования динамики системы. Результаты работы подтверждают перспективность применения MPC для широкого класса механических систем, требующих точной стабилизации в условиях запаздываний в области робототехники и систем автоматизации. Основным ограничением MPC является его высокая вычислительная сложность и зависимость от точности модели. Перспективы дальнейших исследований видятся в разработке адаптивных версий MPC, оптимизации вычислительных алгоритмов для реализации на embedded-платформах, а также в применении нейросетевых алгоритмов управления.

Далее для аппроксимации поведения модельно-прогнозирующего регулятора была использована нейронная сеть прямого распространения, обучаемая по данным, собранным при работе MPC-регулятора на реальном стенде. Архитектура сети выбрана в соответствии с подходом, представленным в работе [7]. Сеть состоит из 6 скрытых слоёв по 6 нейронов в каждом слое и использует функцию активации для каждого нейрона *ReLU*. Входной вектор включает параметры текущего состояния системы и заданного положения, а выходом является управляющее воздействие, эквивалентное сигналу MPC:

$$u_N = f_{NN}(x, \text{setpoint}, \text{velocity}, \text{angle}),$$

где x – координата динамического объекта; setpoint – уставка; velocity – скорость шара; angle – угол наклона платформы.

Выход сети соответствует предсказанному управляющему сигналу u_k , вычисляемому MPC.

Для обучения были использованы экспериментальные данные, собранные с физического стенда и содержащие следующие характеристики: положение шарика, скорость поворота и угол наклона платформы. Входные данные нормировались с помощью стандартизации (StandardScaler), параметры нормировщиков сохранялись для последующего применения при работе сети в реальном времени. Модель обучена в среде «PyTorch» методом «Supervised Learning» с функцией потерь среднеквадратичной ошибки (MSE) и оптимизатором **Adam** (скорость обучения 0.001, 500 эпох). Для оценки обобщающей способности данные были разделены на обучающую и тестовую выборки в пропорции 80/20. После завершения обучения среднеквадратичная ошибка (MSE) на тестовой выборке составила **0.066**. На рис. 5 приведена модель нейронной сети. График динамики обучения приведен на рис. 6, график сравнения отклика MPC и нейросетевого регулятора приведен на рис. 7. Как видно из графиков отклика, показанных на рис. 7, нейронная сеть с высокой точностью повторяет характер управления MPC регулятора.

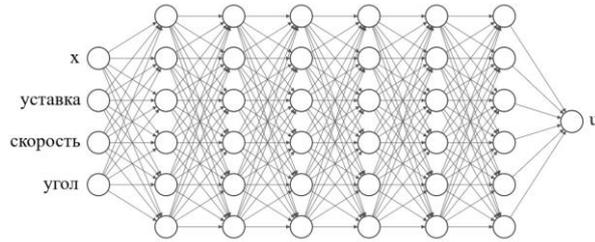


Рис. 5. Модель нейронной сети

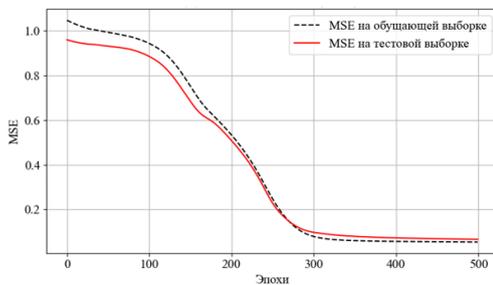


Рис. 6. Динамика обучения нейронной сети



Рис. 7. Сравнение отклика MPC-регулятора и нейронной сети

Для сравнительного анализа эффективности алгоритмов управления были получены переходные характеристики системы по каналу управления, изображённые на рис. 8. Также на каждом шаге управления измерялось время вычисления управляющего сигнала, по результатам чего построены временные зависимости для обоих регуляторов (рис. 9).

Нейросетевой регулятор, работа которого показана на рисунке 9, хотя и характеризуется незначительным увеличением времени переходного процесса, демонстрирует высокое качество управления: переходный процесс остаётся устойчивым и достаточно быстрым, обеспечивая точный выход на уставку.

Кроме того, как показано на рис. 9, при использовании нейросетевого регулятора значительно сокращается время вычисления одного шага управления, что указывает на повышение вычислительной эффективности системы.

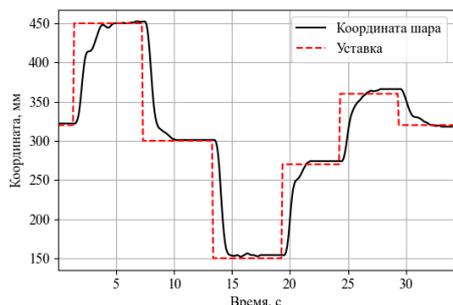


Рис. 8. Переходная характеристика системы с нейросетевым регулятором

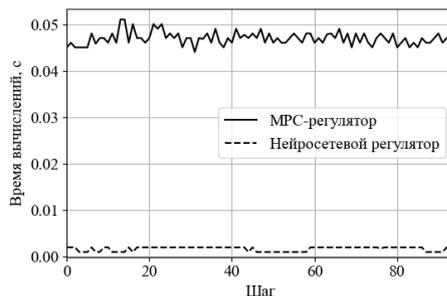


Рис. 9. Время вычисления управляющего воздействия

Для оценки производительности регуляторов проведен количественный анализ ключевых метрик. Сравнение показателей качества управления динамическим объектом при выполнении экспериментов показан в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные показатели качества управления

Показатель качества	Нейросетевой регулятор	MPC-регулятор
Перерегулирование, %	<1 %	<1 %
Время переходного процесса, с	2.08	1.61
Статическая ошибка, мм	3.5	2
Среднее время вычисления шага управления, мс	1.6	47

Из табл. 2 видно, что оба регулятора обеспечивают высокое качество управления при минимальном перерегулировании (менее 1%) и низкой статической ошибке. При этом нейросетевой регулятор демонстрирует лишь небольшое увеличение времени переходного процесса (2.08 с против 1.61 с у MPC), но значительно превосходит его по вычислительной эффективности: время расчёта одного шага управления сокращается примерно в 29 раз (1.6 мс против 47 мс).

Заключение. В данной работе предложен и исследован нейросетевой регулятор, обученный на основе модельно-прогнозирующего контроллера (MPC), для задачи стабилизации положения динамического объекта на подвижной платформе. Экспериментальные результаты показали, что нейросетевая модель способна воспроизводить динамику MPC с высокой точностью, обеспечивая аperiodический и устойчивый переходный процесс с минимальной статической ошибкой. При этом время вычисления управляющего воздействия сокращается примерно в 29 раз, что существенно повышает вычислительную эффективность системы и делает подход применимым в реальном времени для объектов с высокой частотой дискретизации.

Сравнительный анализ показателей качества управления (перерегулирование, время переходного процесса, статическая ошибка) подтвердил сопоставимость работы нейросетевого регулятора с классическим MPC, несмотря на незначительное увеличение времени переходного процесса. Такой результат демонстрирует потенциал использования нейросетевых методов для аппроксимации сложных оптимизационных регуляторов без значительных потерь в качестве управления. Предложенный подход открывает перспективы для дальнейшего применения нейросетевых регуляторов в задачах управления динамически сложными системами с ограниченными вычислительными ресурсами, а также для расширения на более сложные объекты с многомерной динамикой и нелинейными ограничениями.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 25-61-00017.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Афонин В.В., Мурюмин С.М.* Обратные задачи оптимальной стабилизации со скалярным управлением // Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 4. – С. 504-517. – DOI: 10.15507/0236-2910.027.201704.504-517.
2. *Yaseen M.G., Aljanabi M.* Recent Advances in Control Theory for Complex Systems // *Babylonian Journal of Mathematics*. – 2023. – P. 7-11.
3. *Голубев А.Е.* Стабилизация программных движений механических систем с учетом ограничений // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2023. – № 4. – С. 153-167.
4. *Schwenzer M., Ay M., Bergs T., Abel D.* Review on Model Predictive Control: An Engineering Perspective // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 117. – P. 1327-1349. – DOI: 10.1007/s00170-021-07682-3.
5. *Senthil Kumar Arumugasamy, Zainal Ahmad.* Model Predictive Control (MPC) and Its Current Issues in Chemical Engineering // *Chemical Engineering Communications*. – 2012. – 199 (4). – P. 472-511. – DOI: 10.1080/00986445.2011.592446.
6. *Шевлягин С.А., Торгашов А.Ю.* Управление технологическими процессами на основе прогнозирующих моделей: учеб. пособие для вузов. – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2024. – 84 с.
7. *Летихин Т.А.* Методы повышения быстродействия цифровых систем с линейной обратной связью // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2010. – № 4. – С. 96-108.
8. *McAllister R., Chua K., Calandra R. and Levine S.* Deep reinforcement learning in a handful of trials using probabilistic dynamics models // *In Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2018. – P. 4754-4765.
9. *Khajanchi H.I., Bruno J.N., Adegbege A.A.* An Embedded FPGA Architecture for Real-Time Model Predictive Control // *IFAC-PapersOnLine*. – 2020. – Vol. 53 (2). – P. 7833-7838. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1886
10. *Zhang X., Bujarbaruah M., Borrelli F.* Near-Optimal Rapid MPC Using Neural Networks: A Primal-Dual Policy Learning Framework // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – P. 1-13. – DOI: 10.1109/TCST.2020.3024571.
11. *Alsmeier H., Theiner L., Savchenko A., Mesbah A., Findeisen R.* Imitation Learning of MPC with Neural Networks: Error Guarantees and Sparsification // *IEEE 63rd Conference on Decision and Control*. – 2024. – P. 4777-4782. – DOI: 10.48550/arXiv.2501.03671.
12. *Gonzalez C., Asadi H., Kooijman L., Lim C.P.* Neural Networks for Fast Optimisation in Model Predictive Control: A Review // *CoRR*. – 2023. – DOI: 10.48550/ARXIV.2309.02668.
13. *Curtis C., Quackenbush T., Sorensen T., Wingate D., Killpack M.D.* Using First Principles for Deep Learning and Model-Based Control of Soft Robots // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2021. – Vol. 8. – Article 654398. – DOI: 10.3389/frobt.2021.654398.
14. *Karg B., Lucia S.* Efficient Representation and Approximation of Model Predictive Control Laws via Deep Learning // *IEEE Transactions on Cybernetics*. – 2020. – Vol. 50, No. 9. – P. 3866-3878. – DOI: 10.1109/TCYB.2020.2999556.
15. *Phuong T.H., Belov M.P., Tran D.K.* Model predictive controller based on Laguerre functions for largeradio telescope servo control system // *IEEE Conf. El-ConRusNW, SPb*. – 2018. – P. 1020-1024.
16. *Белов М.П., Фьонг Ч.Х., Тхуй Д.В.* Адаптивное прогнозирующее управление следящими электроприводами нелинейных систем с упругими связями // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – № 3. – С. 84-94.
17. *Filimonov A.B., Filimonov N.B.* Synthesis of Servo-systems on the Basis of the Apparatus of Linear-Quadratic Optimization // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. – 2016. – Vol. 17, No. 12. – P. 795-801. – DOI: 10.17587/mau.17.795-801.
18. *He Z., Wu J., Zhang J., Zhang S., Shi Y., Liu H., Sun L., Su Y., Leng X.* CDM-MPC: An Integrated Dynamic Planning and Control Framework for Bipedal Robots Jumping // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2024. – Vol. 9. – P. 6672-6679. – DOI: 10.1109/LRA.2024.3408487.
19. *Ali A.M., Sha'aban Y.A., Salawudeen A.T., Haruna Z., Muhammad B., Mu'azu M.B., Alharthi A.* Optimized Model Predictive Control for Improving Dynamic Stability and Steering Accuracy in Multi-Axle Cranes // *PLoS One*. – 2025. – Vol. 20. – DOI: 10.1371/journal.pone.0324720.
20. *Hou B., Yin Z., Jin X., Fan Z., Wang H.* MPC-Based Dynamic Trajectory Spoofing for UAVs // *Drones*. – 2024. – Vol. 8, No. 10. – P. 602. – DOI: 10.3390/drones8100602.
21. *Tomás L., Lämmle M., Pfafferoth J.* Demonstration and Evaluation of Model Predictive Control (MPC) for a Real-World Heat Pump System in a Commercial Low-Energy Building for Cost Reduction and Enhanced Grid Support // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, No. 6. – P 1434. – DOI: 10.3390/en18061434.

22. Wang H., Liu B., Ping X., An Q. Path-Tracking Control for Autonomous Vehicles Based on an Improved MPC // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 161064-161073. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2944894.
23. Song H., Yue M., Qi G., Cai L., Zhao X. Longitudinal and Yaw Stability Control of Distributed Drive Vehicles Under Low Adhesion Conditions Based on MPC and Trigger Mechanism // Journal of Vibration and Control. – 2025. – Vol. 0, No. 0. – P. 1-17. – DOI: 10.1177/10775463251332835.
24. Wang Y., Sun K., Zhang W., Jin X. A Velocity-Adaptive MPC-Based Path Tracking Method for Heavy-Duty Forklift AGVs // Machines. – 2024. – Vol. 12. – P. 558. – DOI: 10.3390/machines12080558.
25. Benotsmane R., Kovács G. Optimization of Energy Consumption of Industrial Robots Using Classical PID and MPC Controllers // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 3499. – DOI: 10.3390/en16083499.

REFERENCES

1. Afonin V.V., Muryumin S.M. Obratnye zadachi optimal'noy stabilizatsii so skalyarnym upravleniem [Inverse problems of optimal stabilization with scalar control], *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Bulletin of the Mordovian University], 2017, Vol. 27, No. 4, pp. 504-517. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201704.504-517.
2. Yaseen M.G., Aljanabi M. Recent Advances in Control Theory for Complex Systems, *Babylonian Journal of Mathematics*, 2023, pp. 7-11.
3. Golubev A.E. Stabilizatsiya programnykh dvizheniy mekhanicheskikh sistem s uchetom ogranicheniy [Stabilization of program movements of mechanical systems, taking into account restrictions], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izvestia RAS. Theory and control systems], 2023, No. 4, pp. 153-167.
4. Schwenzer M., Ay M., Bergs T., Abel D. Review on Model Predictive Control: An Engineering Perspective, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, Vol. 117, pp. 1327-1349. DOI: 10.1007/s00170-021-07682-3.
5. Senthil Kumar Arumugasamy, Zainal Ahmad. Model Predictive Control (MPC) and Its Current Issues in Chemical Engineering, *Chemical Engineering Communications*, 2012, 199 (4), pp. 472-511. DOI: 10.1080/00986445.2011.592446.
6. Shevlyagin S.A., Torgashov A.Yu. Upravlenie tekhnologicheskimi protsessami na osnove prognoziryuyushchikh modeley: ucheb. posobie dlya vuzov [Process management based on predictive models: a textbook for universities]. Vladivostok: Izd-vo Dal'nevost. federal. un-ta, 2024, 84 p.
7. Lepikhin T.A. Metody povysheniya bystrodeystviya tsifrovyykh sistem s lineynoy obratnoy svyaz'yu [Methods for increasing the speed of digital systems with linear feedback], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 10: Prikladnaya matematika. Informatika. Protssesy upravleniya* [Bulletin of St. Petersburg University. Series 10: Applied Mathematics. Computer science. Management processes], 2010, No. 4, pp. 96-108.
8. McAllister R., Chua K., Calandra R. and Levine S. Deep reinforcement learning in a handful of trials using probabilistic dynamics models, *In Advances in Neural Information Processing Systems*, 2018, pp. 4754-4765.
9. Khajanchi H.I., Bruno J.N., Adegbege A.A. An Embedded FPGA Architecture for Real-Time Model Predictive Control, *IFAC-PapersOnLine*, 2020, Vol. 53 (2), pp. 7833-7838. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1886
10. Zhang X., Bujarbaruah M., Borrelli F. Near-Optimal Rapid MPC Using Neural Networks: A Primal-Dual Policy Learning Framework, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pp. 1-13. DOI: 10.1109/TCST.2020.3024571.
11. Alsmeier H., Theiner L., Savchenko A., Mesbah A., Findeisen R. Imitation Learning of MPC with Neural Networks: Error Guarantees and Sparsification, *IEEE 63rd Conference on Decision and Control*, 2024, pp. 4777-4782. DOI: 10.48550/arXiv.2501.03671.
12. Gonzalez C., Asadi H., Kooijman L., Lim C.P. Neural Networks for Fast Optimisation in Model Predictive Control: A Review, *CoRR*, 2023. DOI: 10.48550/ARXIV.2309.02668.
13. Curtis C., Quackenbush T., Sorensen T., Wingate D., Killpack M.D. Using First Principles for Deep Learning and Model-Based Control of Soft Robots, *Frontiers in Robotics and AI*, 2021, Vol. 8, Article 654398. DOI: 10.3389/frobt.2021.654398.
14. Karg B., Lucia S. Efficient Representation and Approximation of Model Predictive Control Laws via Deep Learning, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, Vol. 50, No. 9, pp. 3866-3878. DOI: 10.1109/TCYB.2020.2999556.
15. Phuong T.H., Belov M.P., Tran D.K. Model predictive controller based on Laguerre functions for largerradio telescope servo control system, *IEEE Conf. El-ConRusNW*, SPb., 2018, pp. 1020-1024.
16. Belov M.P., Fyong Ch.Kh., Tkhuynh D.V. Adaptivnoe prognoziryuyushchee upravlenie sledyashchimi elektroprivodami nelineynykh sistem s uprugimi svyazyami [Adaptive predictive control of tracking electric drives of non-linear systems with elastic bonds], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestia SPbGETU «LETI»], 2019, No. 3, pp. 84-94.

17. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Synthesis of Servo-systems on the Basis of the Apparatus of Linear-Quadratic Optimization, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2016, Vol. 17, No. 12, pp. 795-801. DOI: 10.17587/mau.17.795-801.
18. He Z., Wu J., Zhang J., Zhang S., Shi Y., Liu H., Sun L., Su Y., Leng X. CDM-MPC: An Integrated Dynamic Planning and Control Framework for Bipedal Robots Jumping, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, Vol. 9, pp. 6672-6679. DOI: 10.1109/LRA.2024.3408487.
19. Ali A.M., Sha'aban Y.A., Salawudeen A.T., Haruna Z., Muhammad B., Mu'azu M.B., Alharthi A. Optimized Model Predictive Control for Improving Dynamic Stability and Steering Accuracy in Multi-Axle Cranes, *PLoS One*, 2025, Vol. 20. DOI: 10.1371/journal.pone.0324720.
20. Hou B., Yin Z., Jin X., Fan Z., Wang H. MPC-Based Dynamic Trajectory Spoofing for UAVs, *Drones*, 2024, Vol. 8, No. 10, pp. 602. DOI: 10.3390/drones8100602.
21. Tomás L., Lämmle M., Pfafferoth J. Demonstration and Evaluation of Model Predictive Control (MPC) for a Real-World Heat Pump System in a Commercial Low-Energy Building for Cost Reduction and Enhanced Grid Support, *Energies*, 2025, Vol. 18, No. 6, pp 1434. DOI: 10.3390/en18061434.
22. Wang H., Liu B., Ping X., An Q. Path-Tracking Control for Autonomous Vehicles Based on an Improved MPC, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 161064-161073. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2944894.
23. Song H., Yue M., Qi G., Cai L., Zhao X. Longitudinal and Yaw Stability Control of Distributed Drive Vehicles Under Low Adhesion Conditions Based on MPC and Trigger Mechanism, *Journal of Vibration and Control*, 2025, Vol. 0, No. 0, pp. 1-17. DOI: 10.1177/10775463251332835.
24. Wang Y., Sun K., Zhang W., Jin X. A Velocity-Adaptive MPC-Based Path Tracking Method for Heavy-Duty Forklift AGVs, *Machines*, 2024, Vol. 12, pp. 558. DOI: 10.3390/machines12080558.
25. Benotsmane R., Kovács G. Optimization of Energy Consumption of Industrial Robots Using Classical PID and MPC Controllers, *Energies*, 2023, Vol. 16, pp. 3499. DOI: 10.3390/en16083499.

Комаров Борис Александрович – Национальный исследовательский Томский политехнический университет; e-mail: bak7@tpu.ru; г. Томск, Россия; инженер; аспирант отделения интеллектуальных систем ИШИНЭС.

Леонов Сергей Владимирович – Национальный исследовательский Томский политехнический университет; e-mail: leonov@tpu.ru; г. Томск, Россия; к.т.н.; доцент отделения интеллектуальных систем ИШИНЭС.

Мамонова Татьяна Егоровна – Национальный исследовательский Томский политехнический университет; e-mail: stepte@tpu.ru; г. Томск, Россия; к.т.н.; доцент отделения интеллектуальных систем ИШИНЭС.

Komarov Boris Aleksandrovich – National Research Tomsk Polytechnic University; e-mail: bak7@tpu.ru; Tomsk, Russia; engineer, graduate student.

Leonov Sergey Vladimirovich – National Research Tomsk Polytechnic University; e-mail: leonov@tpu.ru; Tomsk, Russian; cand. of eng. sc.; associate professor.

Mamonova Tatyana Egorovna – National Research Tomsk Polytechnic University; e-mail: stepte@tpu.ru; Tomsk, Russia; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2025-6-287-298

А.И. Татауров, В.Е. Вавилов

АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННЫХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ В РОБОТОТЕХНИКЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГИБРИДНЫХ ПОДХОДОВ

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ традиционных и нейросетевых методов управления электроприводами в робототехнике, с акцентом на выявление их сильных и слабых сторон, определение областей применения и оценку перспектив развития гибридных подходов. Эффективное управление электроприводами является критически важным для современных робототехнических систем, которые должны демонстрировать высокую производительность, надежность и универсальность в различных областях применения. В частности, актуальными задачами являются обеспечение высокоточного отслеживания траектории, энергоэффек-

тивного управления, робастного управления в условиях неопределенностей и возмущений, управление с учетом ограничений, а также синхронизированное и координированное управление несколькими электроприводами. В связи с этим, вопросы оптимизации управления электроприводами, обеспечивающих точность движения, энергоэффективность и адаптацию к изменяющимся условиям, приобретают первостепенное значение. Для достижения этой цели были поставлены следующие взаимосвязанные задачи: систематизация, анализ особенностей и применения традиционных методов управления электроприводами, таких как PID-регуляторы, фильтры Калмана, управление скользящим режимом, модельное прогнозирующее управление; рассмотрение основных подходов к управлению электроприводами на основе нейронных сетей, включая сети прямого пространства, рекуррентные нейронные сети, радиально-базисные функции, нейро-нечеткие системы и обучение с подкреплением; анализ рассмотренных методов с целью выявления их преимуществ и ограничений с точки зрения таких ключевых параметров, как точность отслеживания траектории, робастность к возмущениям и неопределенностям, адаптивность к изменяющимся условиям эксплуатации и вычислительная сложность реализации; исследование и анализ перспектив использования гибридных методов управления электроприводами, сочетающих в себе надежность и качество управления в линейных и структурированных средах традиционных методов и гибкость и адаптируемость методов на основе нейронных сетей в сложных и динамичных робототехнических системах. Краткие выводы исследования указывают на то, что традиционные методы управления электроприводами, такие как PID-регуляторы и управление скользящим режимом, остаются эффективными и предпочтительными в линейных и хорошо определенных системах, характеризующихся простотой и надежностью. В то же время, нейросетевые подходы демонстрируют существенные преимущества при управлении сложными нелинейными системами, а также в условиях неопределенности, требующих адаптации к изменяющимся условиям. Особое внимание уделяется гибридным методам управления, сочетающим сильные стороны традиционных и нейросетевых подходов, которые рассматриваются как наиболее перспективное и многообещающее направление развития, позволяющее создавать интеллектуальные и робастные системы управления электроприводами, способные эффективно функционировать в сложных и динамичных средах.

Методы управления электрическим приводом; традиционные методы; нейросетевые методы; гибридные методы; модельное прогнозирующее управление.

A.I. Tataurov, V.E. Vavilov

ANALYSIS OF TRADITIONAL AND NEURAL NETWORK-BASED CONTROL METHODS FOR ELECTRIC DRIVES IN ROBOTICS AND PERSPECTIVES OF HYBRID APPROACHES

The objective of this study is to conduct a comparative analysis of traditional and neural network-based control methods for electric drives in robotics, with an emphasis on identifying their strengths and weaknesses, determining their areas of application, and assessing the prospects for the development of hybrid approaches. Effective control of electric drives is critically important for modern robotic systems, which must demonstrate high performance, reliability, and versatility in various application domains. Specifically, key challenges include high-precision trajectory tracking, energy-efficient control, robust control under uncertainties and disturbances, constraint-aware control, as well as synchronized and coordinated control of multiple electric drives. In this regard, optimizing the control of electric drives to ensure motion accuracy, energy efficiency, and adaptation to changing conditions becomes a top priority. To achieve this goal, the study systematizes and analyzes the characteristics and applications of traditional electric drive control methods, such as PID controllers, Kalman filters, sliding mode control, and model predictive control. It also examines key neural network-based approaches to electric drive control, including feedforward neural networks, recurrent neural networks, radial basis functions, neuro-fuzzy systems, and reinforcement learning. A comparative analysis of these methods is conducted to identify their advantages and limitations based on key parameters such as trajectory tracking accuracy, robustness to disturbances and uncertainties, adaptability to changing operating conditions, and computational complexity. Additionally, the study investigates and assesses the prospects for hybrid electric drive control methods that combine the reliability and control quality of traditional methods in linear and structured environments with the flexibility and adaptability of neural network-based methods in complex and dynamic robotic systems. The study's key findings indicate that traditional electric drive control methods, such as PID controllers and sliding mode control, remain effective and preferable in linear and well-defined systems due to their simplicity and reliability. At the same time, neural network-based approaches demonstrate significant advantages in controlling complex nonlinear systems, as

well as in uncertain conditions requiring adaptation to changing environments. Special attention is given to hybrid control methods, which integrate the strengths of both traditional and neural network-based approaches. These methods are regarded as the most promising and advanced direction, enabling the development of intelligent and robust electric drive control systems capable of operating efficiently in complex and dynamic environments.

Electric drive control methods; traditional methods; neural network methods; hybrid methods; model predictive control.

Введение. Способность роботов точно и быстро выполнять задачи, адаптироваться к новым условиям и эффективно использовать энергию напрямую связана с качеством управления их электроприводами. В связи с этим, эффективное управление электроприводами является критически важным для современных робототехнических систем, которые должны демонстрировать высокую производительность, надежность и универсальность в различных областях применения [1, 2]. Традиционные методы, такие как PID-регуляторы, обеспечивают надежное управление в простых условиях, в то время как нейронные сети открывают новые возможности для управления сложными системами. Все более популярными становятся гибридные подходы, объединяющие преимущества обоих типов методов. В данной статье будет проведен сравнительный анализ традиционных и нейросетевых методов, а также рассмотрены перспективы гибридных подходов [2–4].

Традиционные методы управления электроприводами, такие как PID-регуляторы и управление скользящим режимом [5, 6] обеспечивают надежное и предсказуемое управление в широком диапазоне задач. Их преимуществами являются относительная простота реализации, хорошо изученная теоретическая база и возможность аналитического расчета параметров. Однако, они могут быть неэффективны в сложных условиях, характеризующихся нелинейностями, неопределенностями и возмущениями. В следующих разделах мы подробно рассмотрим как преимущества, так и ограничения традиционных методов управления, чтобы лучше понять их место в современной робототехнике.

В противоположность традиционным подходам, нейросетевые методы управления электроприводами предлагают принципиально иной подход к решению задач управления. Вместо использования строгих математических моделей, нейронные сети обучаются на данных, аппроксимируя сложные нелинейные зависимости между входными и выходными сигналами системы. К основным преимуществам нейросетевых методов относятся способность к адаптации к изменяющимся условиям, возможность управления сложными нелинейными системами и эффективная работа в зашумленных средах [3, 7]. Однако, нейросетевые методы имеют и ряд существенных недостатков, включая необходимость в больших объемах данных для обучения, высокую вычислительную сложность и трудности с обеспечением устойчивости системы управления [8]. Кроме того, “черный ящик” нейронной сети затрудняет интерпретацию результатов и проверку правильности работы системы управления. Несмотря на эти недостатки, нейросетевые методы находят все большее применение в робототехнике, особенно в задачах, где традиционные методы оказываются неэффективными.

Возникает вопрос, насколько целесообразно постоянное использование нейросетевых методов управления электроприводами. Возможно, более эффективным решением будет разработка гибридных систем, в которых нейросети используются только при необходимости, а в стационарных режимах управление осуществляется с помощью традиционных регуляторов. Подобный подход, сочетающий в себе лучшее из обоих типов методов, мог бы быть особенно перспективным для мобильных роботов и других приложений с ограниченными ресурсами [2]. Например, в исследовании [7], основанном на моделировании в MATLAB, было показано, что в условиях отсутствия шума в обратной связи традиционный PID-регулятор обеспечивает более высокую точность управления роботизированной рукой (четыре однозвенных манипулятора с различными значениями трения), чем нейросетевой контроллер. Однако, при увеличении уровня шума и трения нейросетевой контроллер демонстрирует лучшую устойчивость. Это позволяет предположить, что использование нейросетей целесообразно в тех случаях, когда задачи робота выходят за рамки стационарного режима и требуется адаптация к изменяющимся условиям и возмущениям.

Рассмотрим более подробно каждый из упомянутых методов, начиная с традиционных подходов к управлению электроприводами, в контексте решения основных проблем управления, таких как высокоточное отслеживание траектории, энергоэффективность, робастность, управление с учетом ограничений и синхронизированное управление.

Традиционные методы управления. Традиционные методы управления электроприводами представляют собой хорошо изученные и проверенные временем подходы, основанные на классической теории управления. Они широко применяются в робототехнике благодаря своей относительной простоте реализации, надежности и предсказуемости. Рассмотрим некоторые из них.

1. PID-регуляторы.

PID-регуляторы, благодаря своей простоте и эффективности, широко применяются в управлении электроприводами. Их принцип работы основан на пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. Для улучшения характеристик, особенно при задачах высокоточного отслеживания траектории, применяют компонент прямой связи [2].

В робототехнике PID-регуляторы используются для управления скоростью, током, положением и усилием. В частности, PID-регуляторы решают задачи высокоточного отслеживания траектории [9], синхронизированного и координированного управления несколькими электроприводами (в простых случаях) [4, 6], применяются в системах векторного управления [4], а также для управления звеньями роботов-манипуляторов.

В источнике [9] предложено использование PID-регулятора во внутреннем контуре управления для задания скорости колес мобильного робота, тогда как во внешнем контуре применяется PD-регулятор для управления его положением. Такой подход позволяет эффективно разделить задачи стабилизации скорости и управления траекторией.

Однако, PID-регуляторы имеют ряд ограничений: они требуют точной настройки параметров, могут быть чувствительны к шумам, нелинейностям [7] и сложным динамическим характеристикам. Это ограничивает их применение в задачах робастного управления в условиях неопределенностей и возмущений, энергоэффективного управления и управления с учетом ограничений.

Когда PID-регуляторы не обеспечивают требуемую производительность, могут быть применены другие методы управления, такие как управление скользящим режимом, фильтры Калмана и модельное прогнозирующее управление или же комбинации вышеперечисленных методов с PID-контроллерами. Например, в работе [10] рассматривается применение адаптивного PID-контроллера для управления двухзвенным плоским манипулятором, показывая возможность компенсации неопределенностей. В исследовании [5] применяется PD-регулятор, дополненный нелинейной составляющей обратной связи для компенсации ограничений работы регулятора в условиях нелинейности.

2. Управление скользящим режимом (Sliding Mode Control – SMC).

Управление скользящим режимом – это робастный метод, применяемый в управлении электроприводами. Его принцип основан на принудительном «скольжении» траектории системы по заданной поверхности в пространстве состояний. Для этого управление резко корректируется в зависимости от положения системы, быстро возвращая её к заданному состоянию и удерживая на нём [11].

В робототехнике SMC используется для задач, требующих устойчивого управления в условиях неопределенностей, возмущений и высокоточного отслеживания траектории [11]. Он обеспечивает надёжность работы даже при изменении параметров, внешних помехах и неточных моделях. Метод широко применяется для управления приводами манипуляторов, мобильных роботов и других автоматизированных систем, а также для координированного управления несколькими электроприводами [4]. Кроме высокой робастности, метод характеризуется быстрой реакцией, что делает его эффективным для задач, требующих оперативного управления. В статье [12] SMC используется для управления мобильным роботом с дифференциальными колесами, работающим в условиях неисправностей исполнительных механизмов. Метод позволяет компенсировать неисправности, стабилизировать движение и снижать эффект чаттеринга (chattering).

В источнике [13] SMC применяется для управления мобильным роботом с дифференциальным приводом. В сравнении с PID-регулятором, метод демонстрирует высшую точность, быстродействие, устойчивость к возмущениям и энергоэффективность, что подтверждает его преимущества в управлении динамическими системами.

Несмотря на преимущества, SMC имеет и недостатки. Из-за резких корректировок управления могут возникать высокочастотные колебания (*chattering*), вызывающие износ компонентов и нежелательные вибрации [11]. Для их снижения применяют методы сглаживания управляющего сигнала.

Реализация SMC сложнее, чем у PID-регулятора, и требует тщательного подбора параметров. Кроме того, резкие изменения управления могут снижать энергоэффективность, увеличивая потери энергии.

Для улучшения характеристик SMC его часто комбинируют с адаптивными методами. Например, в [11] предложен адаптивный SMC для управления траекториями манипуляторов, обеспечивающий устойчивость при изменениях параметров. В задачах, требующих снижения колебаний, повышения энергоэффективности или учёта ограничений, могут применяться альтернативные подходы, такие как адаптивное управление и MPC [4].

3. Модельное прогнозирующее управление (Model Predictive Control – MPC).

Модельное прогнозирующее управление – это метод, использующий математическую модель системы для прогнозирования её будущего поведения и выбора оптимальных управляющих воздействий с учётом целевой функции и ограничений. В робототехнике MPC применяется для задач высокоточного отслеживания траектории [14], управления с учётом ограничений и энергоэффективного управления [1]. Метод учитывает динамические характеристики системы, ограничения на положение, скорость, ускорение и усилие приводов, а также внешние факторы, такие как препятствия и условия окружающей среды. Он используется в управлении мобильными роботами, манипуляторами, человекоподобными роботами и многодвигательными системами [4].

В [14] рассмотрено применение MPC для управления траекторией мобильного робота с учётом ограничений на скорость и положение. В [1] MPC выделяется как перспективный метод для энергоэффективного управления моментом и током в электроприводах постоянного тока. В [4] он применяется в динамических режимах синхронного управления многодвигательными системами. В источнике [15] рассмотрено совместное применение MPC и байесовской оптимизации в задачах управления роботом, что позволяет не только оптимизировать параметры управления, но и адаптивно корректировать траекторию движения и энергопотребление на основе накопленных данных. А в [6] MPC используется для управления положением в синхронных многодвигательных системах, обеспечивая высокую точность при динамических изменениях режима работы.

Несмотря на преимущества, MPC требует точной модели системы, что может усложнять его применение, особенно если параметры изменяются со временем. Высокая вычислительная сложность [4] ограничивает использование метода в задачах, требующих быстрого реагирования, а недостаточная робастность к неопределённостям и возмущениям делает необходимым комбинирование MPC с адаптивными схемами для повышения устойчивости и более эффективного взаимодействия робота с окружающей средой.

Для снижения вычислительной сложности используются упрощённые модели и оптимизационные алгоритмы, что позволяет применять MPC даже в системах с ограниченными вычислительными ресурсами. Однако при необходимости повышения робастности к неопределённостям или быстрого реагирования на внешние возмущения MPC комбинируют со скользящим режимом или адаптивными методами управления [4].

4. Фильтр Калмана.

Фильтр Калмана широко применяется в управлении электроприводами, обеспечивая подавление шумов, прогнозирование состояний и компенсацию потерь данных сенсоров. В традиционных методах управления востребованы его расширенная (EKF) и адаптивная (UKF) версии, учитывающие нелинейности системы [3, 16].

В [16] представлен неоднородный двухчастотный EKF (NUDREKF), повысивший точность следования траектории мобильного робота с колёсами Меканума. В [3] EKF использовался для стабилизации движения конечного звена трёхзвенного манипулятора. В [17] UKF применялся для оценки состояния электрического робота в реальном времени, повышая точность планирования траектории.

Фильтр Калмана демонстрирует эффективность в задачах точного следования траектории, компенсации шумов и повышения устойчивости системы к внешним возмущениям. Его применение позволяет учитывать ограничения на измерения и динамику объекта, что особенно важно для управления многозвенными манипуляторами и мобильными

ми роботами. В отличие от PID-регуляторов, он не предназначен для непосредственного регулирования усилия и скорости, но обеспечивает высокую точность оценки состояния системы. В отличие от скользящего режима (SMC) и предиктивного управления (MPC), он не гарантирует устойчивость в условиях жёстких ограничений, но эффективно дополняет эти методы, повышая надёжность управления.

Таким образом, фильтр Калмана остаётся ключевым инструментом в системах управления, требующих высокой точности и устойчивости. Его сочетание с другими методами регулирования позволяет компенсировать неопределённости, минимизировать влияние шумов и повышать качество управления, что подтверждается примерами его применения в [3, 16, 17].

Для полноты картины, отметим, что существуют и другие нерассмотренные выше подходы. Например, для решения задач адаптивного управления, в частности, с целью улучшения управления роботизированными системами, предлагаются стратегии на основе эталонной модели (MRAC), позволяющие улучшить характеристики управления. В условиях неопределённости и возмущений для роботов-манипуляторов также разработан робастный H_∞ контроллер, зачастую превосходящий другие подходы, такие как управление с компенсацией задержки и управление скользящим режимом.

Рассмотренные выше методы представляют собой фундамент эффективного управления электроприводами и робототехникой, особенно в задачах с известной динамикой и предсказуемыми условиями. Однако, для работы в более сложных и изменчивых условиях, таких как системы с высокой степенью нелинейности, неполной информацией о среде и сложными алгоритмами взаимодействия, становятся все более востребованы методы, основанные на искусственном интеллекте. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области являются нейросетевые методы управления.

Нейросетевые методы управления. Нейросетевые методы управления представляют собой современный подход, основанный на принципах искусственного интеллекта и машинном обучении. Они открывают новые возможности в управлении электроприводами и робототехникой, позволяя решать сложные задачи, которые трудно решить традиционными методами.

1. Нейросети прямого распространения (Feedforward Neural Networks - FNN) и многослойные перцептроны (Multilayer Perceptrons - MLPs).

Нейронные сети прямого распространения и многослойные перцептроны – это класс нейронных сетей, в которых информация движется только в одном направлении – от входа к выходу, без обратных связей. В робототехнике и управлении электроприводами FNN/MLP используются для аппроксимации нелинейных функций, решения обратной кинематики и управления движением [3]. Благодаря способности к нелинейной аппроксимации они эффективно используются в управлении электроприводами, поскольку позволяют учитывать сложные зависимости между входными и выходными параметрами системы. FNN могут применяться для целевой обратной кинематики (task-specific IK), моделирования характеристик электроприводов и построения нелинейных регуляторов.

В [3] FFNN используется для аппроксимации обратной кинематики робота, обеспечивая грубую оценку углов сочленений. Дополнительно применяется фильтр Калмана, который уточняет полученные оценки. В [8] рассматривается использование FNN для целевой обратной кинематики робота ABB IRB 6700, демонстрируя сокращение времени обучения и высокую точность предсказаний. FNN также применяются для решения задачи обратной статикой для мягких манипуляторов, позволяя эффективно захватывать объекты [18]. Основным ограничением FNN/MLP является необходимость большого количества данных для обучения [8]. Кроме того, для достижения высокой точности требуется тщательная настройка архитектуры сети и параметров обучения.

Для повышения эффективности FNN/MLP используются различные методы обучения, такие как обратное распространение ошибки Левенберга-Марквардта. Однако, при необходимости работы в условиях неопределённости или сложной динамики, FNN часто комбинируют с другими методами управления, такими как фильтр Калмана [3].

2. Рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Networks – RNNs), в частности, сети с долгой краткосрочной памятью (Long Short-Term Memory – LSTM).

Рекуррентные нейронные сети – это класс нейронных сетей, предназначенных для обработки последовательных данных и учитывающих временные зависимости. Ключевой особенностью RNN является наличие рекуррентных связей, позволяющих информации циркулировать внутри сети и сохранять контекст прошлых состояний. LSTM, как продвинутый тип RNN, эффективно преодолевают проблему затухания градиента, что позволяет им устанавливать связи между событиями, разделенными значительными временными интервалами. В робототехнике RNN/LSTM применяются для управления манипуляторами [19], моделирования динамики роботов [18], планирования траекторий [19, 20], а также прогнозирования энергопотребления.

В [19] предложен RNN-подход для решения задачи избыточности в управлении манипулятором с учетом ограничений на дистанционный центр вращения (RCM). В [20] LSTM используется для предсказания и коррекции траектории мобильного робота в динамической среде. Реализация основана на системе ROS и симуляторе Gazebo, что позволяет тестировать алгоритмы в виртуальной среде перед реальной эксплуатацией. В [21] LSTM применяется в комбинации с адаптивным регулятором скользящего режима (ASMC) для робастного управления движением манипулятора.

Несмотря на преимущества, обучение RNN/LSTM может быть сложной задачей [18], требующей значительного объема данных и тщательной настройки параметров. Сложность архитектуры сети и процесса обучения могут ограничивать использование RNN/LSTM в задачах, требующих быстрого реагирования.

Для повышения эффективности RNN/LSTM используются различные методы обучения и архитектуры, такие как оптимизация Adam [20]. Также, для улучшения генерализации и компенсации влияния возмущений, RNN/LSTM комбинируют с адаптивными методами управления [21].

3. Радиально-базисные функции (Radial Basis Function – RBF).

Радиально-базисные функции – это класс нейронных сетей, использующих радиально-симметричные функции для аппроксимации сложных нелинейных зависимостей. RBF-сети применяются для решения задач классификации, идентификации систем, управления роботами и компенсации неопределенностей [22–25]. В робототехнике RBF-сети находят применение в задачах, требующих адаптации к изменяющимся условиям и высокой точности управления. Они используются в управлении многодвигательными системами [25], экзоскелетами [24] и манипуляторами [23]. Метод учитывает нелинейные характеристики системы, позволяет идентифицировать параметры и может быть использован для повышения робастности управления в условиях неопределенности или возмущений.

В [25] RBF используется в кооперативном управлении многодвигательной системой, где автоматически подстраивает параметры PID-регулятора для обеспечения синхронного движения нескольких электроприводов. В [22] RBF сеть применяется для построения адаптивного отказоустойчивого управления для роботов с неизвестным направлением управления. В [23] RBF-сети интегрируются с нелинейным модельным прогнозирующим управлением (NMPC) для обеспечения устойчивого отслеживания траектории манипуляторов. А в [24] RBF-сети используются для разработки контроллера экзоскелета нижней конечности человека.

Несмотря на преимущества, RBF-сети требуют выбора оптимального количества центров и настройки параметров функций активации, что может быть сложной задачей. Высокая чувствительность к параметрам и необходимость в предварительной обработке данных могут ограничивать использование метода в задачах, требующих быстрой адаптации.

Для повышения эффективности RBF-сетей используются различные методы выбора центров базисных функций, такие как кластеризация данных и градиентные методы. Однако, при необходимости повышения робастности или адаптации к сложным динамическим системам, RBF-сети комбинируют с другими методами управления, такими как скользящий режим или модельное прогнозирующее управление [21, 23].

4. Нейро-нечеткие системы (Neuro-Fuzzy Systems).

Нейро-нечеткие системы – это гибридный подход, сочетающий преимущества нейронных сетей и нечеткой логики, позволяющий создавать интеллектуальные системы управления, способные адаптироваться к сложным и неопределенным условиям. Метод

позволяет учитывать экспертные знания и опыт, комбинируя их с возможностями машинного обучения, а также обеспечивает учет нелинейностей и возмущений. В робототехнике нейро-нечеткие системы применяются в задачах управления траекториями, обхода препятствий и синхронизации движений [26, 27].

В [26] предлагается адаптивный самонастраивающийся нечеткий логический контроллер для управления роботами-манипуляторами, обеспечивающий устойчивое отслеживание траектории в условиях динамических неопределенностей. В [27] используется нечеткий логический регулятор второго типа (Type-2 fuzzy logic controller) для обхода препятствий мобильным роботом Robotino.

Несмотря на преимущества, нейро-нечеткие системы требуют тщательной разработки структуры, правил нечеткого вывода и настройки параметров [18], что может быть сложной задачей. Требования к экспертным знаниям и высокая вычислительная сложность обучения могут ограничивать применение метода в задачах, требующих быстрой разработки и высокой скорости реагирования.

Для повышения эффективности нейро-нечеткие системы используют различные методы обучения и адаптивные алгоритмы. При необходимости повышения робастности к неопределенностям нейро-нечеткие системы комбинируют с другими методами управления, такими как адаптивное управление и активное подавление помех [26].

5. Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning – RL).

Обучение с подкреплением – это метод машинного обучения, при котором система разрабатывает оптимальную стратегию действий на основе взаимодействия со средой, получая за свои решения вознаграждения или штрафы. В робототехнике RL применяется для решения сложных задач управления, требующих адаптации к изменяющимся условиям. Этот подход позволяет разрабатывать автономные системы управления, способные обучаться самостоятельно и работать в неструктурированной среде [28]. К некоторым задачам, решаемым с помощью RL относят захват и перемещение объектов [29], навигацию и выполнение операций, связанных с физическим взаимодействием робота с окружающей средой [28].

В работе [29] RL комбинируется с моделью Markov Decision Process (MDP) в задаче оптимального захвата и переноса объектов манипулятором, что повышает стабильность управления. В [2] применяется RL-метод Adaptive Dynamic Programming (ADP) для управления роботом SCARA, обучая нейросеть минимизировать ошибки позиционирования. Исследование [28] посвящено применению RL для управления движением робота при взаимодействии с объектами. В [49] представлен обзор методов глубокого обучения с подкреплением для задач управления роботами-манипуляторами, в частности, для повышения эффективности и обобщения навыков при выполнении операций захвата, перемещения и сборки объектов.

Несмотря на свои преимущества, RL требует длительного обучения, чувствителен к настройке параметров и может испытывать трудности при переходе от симуляции к реальной среде [30]. Кроме того, обучение непосредственно на оборудовании может быть затратным и сопряжено с риском его повреждения.

Для повышения эффективности RL используют оптимизацию функции вознаграждения, обучение на примерах и применение глубоких нейросетей [28, 30]. Также для увеличения устойчивости алгоритмов и ускорения обучения RL часто комбинируют с другими методами машинного обучения.

Нейросетевые методы предлагают гибкие и адаптивные подходы к управлению: они способны аппроксимировать сложные нелинейные зависимости, определять параметры системы и эффективно адаптироваться к изменяющимся условиям. В частности, обучение с подкреплением позволяет создавать полностью автономные системы управления, способные к самообучению и оптимизации собственного поведения. Однако стоит заметить, что кроме локальных проблем каждого отдельно взятого метода, все нейросетевые методы страдают все еще недостаточной изученностью, имеют высокие требования к вычислительным ресурсам, количеству и качеству данных для обучения.

Заключение. Анализ традиционных и нейросетевых методов управления электроприводами в робототехнике показывает, что оба подхода имеют свои преимущества и ограничения. Традиционные методы, обладая высокой предсказуемостью и надежностью, остаются наиболее эффективными для линейных систем, особенно с учетом затрат на разработку, настройку и отладку. Их использование, как правило, оправдано в тех случаях, когда динамика системы хорошо изучена, а внешние условия остаются относительно стабильными.

Нейросетевые методы, в свою очередь, предлагают гибкость и возможность адаптации к сложным, нелинейным и зашумленным средам. Однако их применение требует значительных вычислительных ресурсов, больших объемов данных для обучения и тщательной предварительной обработки. Кроме того, длительный процесс обучения и сложности в интерпретации работы таких систем ограничивают их широкое использование в реальных приложениях.

Таким образом, одной из перспективных стратегий является создание гибридных систем, в которых нейросетевые методы интегрируются в традиционные системы управления, но активируются только при необходимости. Такой подход позволяет минимизировать вычислительные затраты и сохранять устойчивость управления в стандартных режимах, включая нейросетевые компоненты лишь в условиях значительных нелинейностей, неопределенностей или помех.

Кроме того, хочется отметить, что даже в рамках рассмотренных мною традиционных и нейросетевых методов можно наблюдать элементы, заимствованные из других подходов, например, адаптивные алгоритмы, используемые для улучшения характеристик PID-регуляторов или же часто встречается использование фильтра Калмана для повышения точности работы и надежности нейросетевых контроллеров.

Этот принцип адаптивного использования нейросетевых методов может стать важным направлением дальнейших исследований, обеспечивая баланс между эффективностью, надежностью и вычислительными затратами.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 24-29-00675 «Разработка фундаментальных научных основ высокоэффективного электромеханического преобразователя энергии с повышенными удельными характеристиками и элементов гибридной силовой установки».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Shahid M., Jin W., Abbasi M., Husain A., Munir H., Hassan M., Flah A., Souissi A.S.E., and Alghamdi T.A.H.* Model predictive control for energy efficient AC motor drives: An overview // IET Electric Power Applications. – 2024. – No. 18. – P. 1894-1920.
2. *Tinoco V., Silva M., Neves Dos Santos F., Morais R., and Moura Oliveira P.* A review of advanced controller methodologies for robotic manipulators // International Journal of Dynamics and Control. – 2025. – No. 13.
3. *Joo D., and Yeom K.* Improved Hybrid Trajectory Tracking Algorithm for a 3-link Manipulator Using Artificial Neural Network and Kalman Filter // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2021. – P. 60-66.
4. *Niu F., Sun K., Huang S., Hu Y., Dong L., and Fang Y.* A Review on Multi-motor Synchronous Control Methods // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2022. – No. PP. – P. 1-1.
5. *Gul S., Zergeroglu E., Tatlicioglu E., and Kilinc M.V.* Desired model compensation-based position constrained control of robotic manipulators // Robotica. – 2021. – No. 40. – P. 1-15.
6. *Zhang X., Hu H., Wang H., and Wang Z.* Overview of position synchronous control technology for multi-motor system // Systems Science & Control Engineering. – 2024. – No. 12.
7. *Ariss J., Rabat S.* A comparison between a traditional PID controller and an Artificial Neural Network controller in manipulating a robotic arm (En jämförelse mellan en traditionell PIDstyrenhet och en Artificiell Neural Nätverksstyrenhet för att styra en robotarm) // TRITA-EECS-EX. – 2019. Studentuppsats (Examensarbete). – 29 p.
8. *Wu Y., Huang R., Li X., and Liu S.* Adaptive neural network control of uncertain robotic manipulators with external disturbance and time-varying output constraints // Neurocomputing. – 2018. – No. 323.
9. *Фролов В.Я., Юсеф Б.* Моделирование и нелинейное управление неголономным автомобилеподобным мобильным роботом, отслеживающим траекторию // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 381-388. – doi: 10.24412/2071-6168-2024-2-381-382.

10. Qiao L., Zhao M., Wu C., Ge T., Fan R., and Zhang W. Adaptive PID control of robotic manipulators without equality/inequality constraints on control gains // *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. – 2021. – No. 32.
11. Mustafa M.M., Hamarash I., Crane C.D. Adaptive-Sliding Mode Trajectory Control of Robot Manipulators with Uncertainties // *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*. – 2020. – No. 32 (4). – P. 22-29.
12. Qin M., Dian S., Guo B., Tao X., & Zhao T. Fractional-order SMC controller for mobile robot trajectory tracking under actuator fault // *Systems Science & Control Engineering*. – 2022. – 10. – P. 312-324.
13. Yigit S., & Sezgin A. Trajectory Tracking via Backstepping Controller with PID or SMC for Mobile Robots // *Sakarya University Journal of Science*. – 2023. – 27 (1). – P. 120-134.
14. Limon D., and Alamo T. Tracking Model Predictive Control // *Encyclopedia of Systems and Control* / ed. Baillieul, John and Samad, Tariq. – London: Springer London, 2013. – P. 1-12.
15. Holzmann P., Pfefferkorn M., Peters J., Findeisen R. Learning Energy-Efficient Trajectory Planning for Robotic Manipulators Using Bayesian Optimization // *Матер. Европейской конференции по управлению (European Control Conference (ECC)), Стокгольм, Швеция. 2024.* – С. 1374-1379.
16. Pizá R., Carbonell R., Casanova V., Cuenca Á., and Salt Llobregat J.J. Nonuniform Dual-Rate Extended Kalman-Filter-Based Sensor Fusion for Path-Following Control of a Holonomic Mobile Robot with Four Mecanum Wheels // *Appl. Sci.* – 2022. – No. 12. – 3560.
17. Kuang C., and Zheng X. Space Trajectory Planning of Electric Robot Based on Unscented Kalman Filter // *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*. – 2021. – No. 15 (1). – P. 29-38.
18. Kim D., Kim S-H., Kim T., Kang B., Lee M., Park W., Ku S., Kim D., Kwon J., Lee H., Bae J., Park Y-L., Cho K-J., and Jo S. Review of machine learning methods in soft robotics // *PLOS ONE*. – 2021. – No. 16. – P. e0246102.
19. Li Z., and Li S. Model-based recurrent neural network for redundancy resolution of manipulator with remote centre of motion constraints // *International Journal of Systems Science*. – 2022. – No. 53. – P. 1-14.
20. Molina-Leal A., Gómez-Espinosa A., Escobedo Cabello J., Cuan-Urquizo E., and Cruz-Ramirez S.R. Trajectory Planning for a Mobile Robot in a Dynamic Environment Using an LSTM Neural Network // *Applied Sciences*. – 2021. – No. 11. – P. 10689.
21. Patel R., Zeinali M., and Passi K. Deep Learning-based Robot Control using Recurrent Neural Networks (LSTM; GRU) and Adaptive Sliding Mode Control.
22. Wang H., Zhou X., and Tian Y. Robust adaptive fault-tolerant control using RBF-based neural network for a rigid-flexible robotic system with unknown control direction // *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. – 2021. – No. 32.
23. Recalde L.F., Varela J., Guevara B.S., Andaluz V., and Gandolfo D. Adaptive NMPC-RBF with Application to Manipulator Robots // *2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. – 2023. – P. 2475-2482.
24. Hasan S.K. Radial basis function-based exoskeleton robot controller development // *IET Cyber-Systems and Robotics*. – 2022. – No. 4. – P. 228-250.
25. Zhao M., Wang Q., Wang Y., and Dong Q. Multi-Motor Cooperative Control Strategy for Speed Synchronous Control of Construction Platform // *Electronics*. – 2022. – No. 11. – P. 4162.
26. Yilmaz B., Tatlicioglu E., Savran A., and Alci M. Self-Adjusting Fuzzy Logic Based Control of Robot Manipulators In Task Space // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2021. – No. PP. – P. 1-1.
27. Al-Mallah M., Ali M., and Al-Khawaldeh M. Obstacles Avoidance for Mobile Robot Using Type-2 Fuzzy Logic Controller // *Robotics*. – 2022. – No. 11. – P. 130.
28. Elguea-Aguinaco Í., Serrano Muñoz A., Chrysostomou D., Inziarte-Hidalgo I., Bøgh S., and Arana-Arexolaleiba N. A review on reinforcement learning for contact-rich robotic manipulation tasks // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2023. – No. 81. – P. 102517.
29. Lobbezoo A., Qian Y., and Kwon H-J. Reinforcement Learning for Pick and Place Operations in Robotics: A Survey // *Robotics*. – 2021. – No. 10. – P. 105.
30. Liu R., Nageotte F., Zanne P., De Mathelin M., and Dresch B. Deep Reinforcement Learning for the Control of Robotic Manipulation: A Focussed Mini-Review // *Robotics*. – 2021. – No. 10. – P. 22.

REFERENCES

1. Shahid M., Jin W., Abbasi M., Husain A., Munir H., Hassan M., Flah A., Souissi A.S.E., and Alghamdi T.A.H. Model predictive control for energy efficient AC motor drives: An overview, *IET Electric Power Applications*, 2024, No. 18, pp. 1894-1920.
2. Tinoco V., Silva M., Neves Dos Santos F., Morais R., and Moura Oliveira P. A review of advanced controller methodologies for robotic manipulators, *International Journal of Dynamics and Control*, 2025, No. 13.
3. Joo D., and Yeom K. Improved Hybrid Trajectory Tracking Algorithm for a 3-link Manipulator Using Artificial Neural Network and Kalman Filter, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2021, pp. 60-66.

4. Niu F., Sun K., Huang S., Hu Y., Dong L., and Fang Y. A Review on Multi-motor Synchronous Control Methods, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2022, No. PP, pp. 1-1.
5. Gul S., Zergeroglu E., Tatlicioglu E., and Kilinc M.V. Desired model compensation-based position constrained control of robotic manipulators, *Robotica*, 2021, No. 40, pp. 1-15.
6. Zhang X., Hu H., Wang H., and Wang Z. Overview of position synchronous control technology for multi-motor system, *Systems Science & Control Engineering*, 2024, No. 12.
7. Ariss J., Rabat S. A comparison between a traditional PID controller and an Artificial Neural Network controller in manipulating a robotic arm (En jämförelse mellan en traditionell PIDstyrenhet och en Artificiell Neural Nätverksstyrenhet för att styra en robotarm), *TRITA-EECS-EX*, 2019. Studentuppsats (Examensarbete), 29 p.
8. Wu Y., Huang R., Li X., and Liu S. Adaptive neural network control of uncertain robotic manipulators with external disturbance and time-varying output constraints, *Neurocomputing*, 2018, No. 323.
9. Frolov V.Ya., Yusef B. Modelirovanie i nelineynoe upravlenie negolonomnym avtomobilepodobnym mobil'nym robotom, otslezhivayushchim traektoriyu [Modeling and nonlinear control of a nonholonomic car-like mobile robot tracking a trajectory], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Engineering sciences], 2024, No. 2, pp. 381-388. doi: 10.24412/2071-6168-2024-2-381-382.
10. Qiao L., Zhao M., Wu C., Ge T., Fan R., and Zhang W. Adaptive PID control of robotic manipulators without equality/inequality constraints on control gains, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2021, No. 32.
11. Mustafa M.M., Hamarash I., Crane C.D. Adaptive-Sliding Mode Trajectory Control of Robot Manipulators with Uncertainties, *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*, 2020, No. 32 (4), pp. 22-29.
12. Qin M., Dian S., Guo B., Tao X., & Zhao T. Fractional-order SMC controller for mobile robot trajectory tracking under actuator fault, *Systems Science & Control Engineering*, 2022, 10, pp. 312-324.
13. Yigit S., & Sezgin A. Trajectory Tracking via Backstepping Controller with PID or SMC for Mobile Robots, *Sakarya University Journal of Science*, 2023, 27 (1), pp. 120-134.
14. Limon D., and Alamo T. Tracking Model Predictive Control, *Encyclopedia of Systems and Control / ed. Baillieul, John and Samad, Tariq*. London: Springer London, 2013, pp. 1-12.
15. Holzmann P., Pfefferkorn M., Peters J., Findeisen R. Learning Energy-Efficient Trajectory Planning for Robotic Manipulators Using Bayesian Optimization, *Mater. Evropeyskoy konferentsii po upravleniyu (European Control Conference (ECC))*, *Stokgol'm, Shvetsiya. 2024* [Proceedings of the European Control Conference (ECC), Stockholm, Sweden. 2024], pp. 1374-1379.
16. Pizá R., Carbonell R., Casanova V., Cuenca Á., and Salt Llobregat J.J. Nonuniform Dual-Rate Extended Kalman-Filter-Based Sensor Fusion for Path-Following Control of a Holonomic Mobile Robot with Four Mecanum Wheels, *Appl. Sci.*, 2022, No. 12, 3560.
17. Kuang C., and Zheng X. Space Trajectory Planning of Electric Robot Based on Unscented Kalman Filter, *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 2021, No. 15 (1), pp. 29-38.
18. Kim D., Kim S-H., Kim T., Kang B., Lee M., Park W., Ku S., Kim D., Kwon J., Lee H., Bae J., Park Y-L., Cho K-J., and Jo S. Review of machine learning methods in soft robotics, *PLOS ONE*, 2021, No. 16, pp. e0246102.
19. Li Z., and Li S. Model-based recurrent neural network for redundancy resolution of manipulator with remote centre of motion constraints, *International Journal of Systems Science*, 2022, No. 53, pp. 1-14.
20. Molina-Leal A., Gómez-Espinosa A., Escobedo Cabello J., Cuan-Urquizo E., and Cruz-Ramirez S.R. Trajectory Planning for a Mobile Robot in a Dynamic Environment Using an LSTM Neural Network, *Applied Sciences*, 2021, No. 11, pp. 10689.
21. Patel R., Zeinali M., and Passi K. Deep Learning-based Robot Control using Recurrent Neural Networks (LSTM; GRU) and Adaptive Sliding Mode Control.
22. Wang H., Zhou X., and Tian Y. Robust adaptive fault-tolerant control using RBF-based neural network for a rigid-flexible robotic system with unknown control direction, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2021, No. 32.
23. Recalde L.F., Varela J., Guevara B.S., Andaluz V., and Gandolfo D. Adaptive NMPC-RBF with Application to Manipulator Robots, *2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 2023, pp. 2475-2482.
24. Hasan S.K. Radial basis function-based exoskeleton robot controller development, *IET Cyber-Systems and Robotics*, 2022, No. 4, pp. 228-250.
25. Zhao M., Wang Q., Wang Y., and Dong Q. Multi-Motor Cooperative Control Strategy for Speed Synchronous Control of Construction Platform, *Electronics*, 2022, No. 11, pp. 4162.
26. Yilmaz B., Tatlicioglu E., Savran A., and Alci M. Self-Adjusting Fuzzy Logic Based Control of Robot Manipulators In Task Space, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, No. PP, pp. 1-1.

27. Al-Mallah M., Ali M., and Al-Khawaldeh M. Obstacles Avoidance for Mobile Robot Using Type-2 Fuzzy Logic Controller, *Robotics*, 2022, No. 11, pp. 130.
28. Elguea-Aguinaco Í., Serrano Muñoz A., Chrysostomou D., Inziarte-Hidalgo I., Bøgh S., and Arana-Arexolaleiba N. A review on reinforcement learning for contact-rich robotic manipulation tasks, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023, No. 81, pp. 102517.
29. Lobbezoo A., Qian Y., and Kwon H-J. Reinforcement Learning for Pick and Place Operations in Robotics: A Survey, *Robotics*, 2021, No. 10, pp. 105.
30. Liu R., Nageotte F., Zanne P., De Mathelin M., and Dresp B. Deep Reinforcement Learning for the Control of Robotic Manipulation: A Focussed Mini-Review, *Robotics*, 2021, No. 10, pp. 22.

Татауров Александр Игоревич – Уфимский университет науки и технологий; e-mail: tataurov.ai@ugatu.su; г. Уфа, Россия; тел.: +79196114331; ПИШ «Моторы Будущего»; аспирант; инженер.

Вавилов Вячеслав Евгеньевич – Уфимский университет науки и технологий; e-mail: vavilov.ve@ugatu.su; г. Уфа, Россия; ПИШ «Моторы Будущего»; д.т.н.; профессор.

Tataurov Alexander Igorevich – Ufa University of Science and Technology; e-mail: tataurov.ai@ugatu.su; Ufa, Russia; phone: +79196114331; Advanced Engineering School “Engines of the Future”; postgraduate student; engineer.

Vavilov Vyacheslav Evgenievich – Ufa University of Science and Technology; e-mail: vavilov.ve@ugatu.su; Ufa, Russia; Advanced Engineering School “Engines of the Future”; dr. of eng. sc.; professor.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор *Word 7 for Windows*, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом *не менее 250-300 слов*. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации *не следует* давать ссылки на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны *в редакторе формул Word 7 for Windows*.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. *Ссылок должно быть не менее 20-ти*, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.