№4-2025

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

№ 4 (246). 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.; Куповых Г.В.; Левин И.И.; 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.
Ответственный за выпуск Клевцов С.И.
Технический редактор Ярошевич Н.В.
Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 29.08. 2025 г. Формат $70\times108\ {}^{1}\!/_{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 26,1. Уч.-изд. л. – 19,7.
Заказ № 10090. 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

А.В. Болгак, Э.И. Ватутин, Д.А. Трокоз
ОЦЕНКА ВРЕМЕННЫХ ЗАТРАТ НА УМНОЖЕНИЕ КВАДРАТНЫХ БИНАРНЫХ МАТРИЦ УСТРОЙСТВА С КОНВЕЙЕРИЗАЦИЕЙ ЧТЕНИЯ ДАННЫХ ИЗ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ МНОГОПОРТОВОЙ ПАМЯТИ 6

М.А. Ганжур, Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев
МНОГОСТАДИЙНЫЙ МУРАВЬИНЫЙ АЛГОРИТМ ОДНОМЕРНОЙ УПАКОВКИ НА БАЗЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ КОДИРОВАНИЯ РЕШЕНИЙ, И ДВУХУРОВНЕВОЙ ЭВОЛЮЦИОННОЙ ПАМЯТИ 21

И.Е. Моисеенко, С.П. Тарасов, И.И. Турулин
АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И ОСОБЕННОСТЕЙ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ФИЛЬТРОВ ХОГЕНАУЭРА КАК РЕКУРСИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ 37

С.И. Клевцов
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТОЧЕК ВРЕМЕННОГО РЯДА ПАРАМЕТРА 47

В.А. Частикова, А.С. Бахтин, П.А. Меркулов
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНТЕГРАЦИИ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЫ ЦЕНТРА МОНИТОРИНГА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ 57

А.Ю. Юрченко, М.Ю. Поленов
РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ШТРИХКОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕЙ 70

А.С. Жук
ПРИМЕНЕНИЕ РЮКЗАЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ МЕЖДУ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ НСД 80

РАЗДЕЛ II. АНАЛИЗ ДАННЫХ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ

В.А. Костюков
МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАЗНЕСЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ГРУППЫ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ ПРЕПЯТСТВИЙ 92

А.А. Богнюков, Д.Ю. Зорькин, И.А. Тарасова
ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ПРОЕКТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ: ДИАГРАММА ГАНТА И СЕТЕВОЙ ГРАФИК 102

А.Б. Клименко
МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В ДИНАМИЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДАХ 110

С.И. Носков, С.В. Беляев
ГРУППИРОВКА ПРЕДИКТОРОВ В КОМБИНИРОВАННОЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ 120

Н.К. Полуянович, Н.И. Светличный, О.В. Качелаев, М.Н. Дубяго
НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В МИКРОСЕТЯХ С МЕХАТРОННОЙ ВЕТРО-ГЕНЕРАТОРНОЙ СИСТЕМОЙ 128

Ф.А. Хуссейн, В.А. Костюков
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ 144

А.Ю. Таранов
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕМПОРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИНТЕРНЕТ-ДИСКУССИЙ НА ОСНОВЕ КОЛИЧЕСТВА И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ 155

А.Н. Целых, В.С. Васильев, Л.А. Целых, С.А. Барковский
РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ГРАФОВ ПРИ ОТСУТСТВИИ НАБЛЮДАЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ 163

РАЗДЕЛ III. ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Б. Г. Коноплев
ОСОБЕННОСТИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЦИФРОВЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ КМОП-ТЕХНОЛОГИЙ 90–20 НМ 174

О.В. Афанасьева, Т.Ф. Туляков
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАДИЦИОННЫХ И СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МОНИТОРИНГА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 182

Д.А. Богданец, В.И. Грищенко, К.Ф. Калмыкова, А.И. Рахманов, Д.С. Цымбалов
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ГОРЕЛКИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ФАКЕЛА 189

А.Ю. Звягин, К.А. Бойков
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ МЕТОДА АКТИВНОЙ РАДИОСЕНСОРНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ 201

А.И. Рыбаков
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЭКВАЛАЙЗЕРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ В ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОЛИНИЯХ 212

В.П. Федосов, А.В. Циркуленко
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ MIMO-OFDM К АКТИВНЫМ ПОМЕХАМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ 227

РАЗДЕЛ IV. МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

З. Ахмад, Ю.А. Кравченко, А.М. Мансур
ОПТИМИЗАЦИЯ ПИД-ПАРАМЕТРОВ СЕРВОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА И НЕЙРОСЕТЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА 237

М.А. Лапина, Д.А. Лукьянов, В.Г. Лапин, Н.Н. Кучеров
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ САЙТОВ-МОШЕННИКОВ 250

М.А. Хапова, К.Ч. Бжихатлов, Л.Б. Кокова
РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОГО РОБОТА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПРОДАВЦА - КОНСУЛЬТАНТА В СЕТЯХ РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ 262

И.С. Фомин, В.Д. Матвеев, А.Е. Архипов
СОПОСТАВЛЕНИЕ СПАЙКОВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ И НАВИГАЦИИ В КАРТЕ КЛЮЧЕВЫХ КАДРОВ 273

С.С. Обаид, В.А. Погонин, И.Б. Кирина
ИНТЕГРАЦИЯ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛИ ВЛАГОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «УМНЫЙ САД» 284

CONTENT

SECTION I. INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS

A.V. Bolgak, E.I. Vatutin, D.A. Trokoz
ESTIMATION OF TIME SPENT ON MULTIPLICATION OF SQUARE BINARY MATRICES OF A DEVICE WITH PIPELINING OF DATA READING FROM SPECIALIZED MULTIPORT MEMORY 6

M.A. Ganzhur, B.K. Lebedev, O.B. Lebedev
MULTI-STAGE ANT ALGORITHM OF ONE-DIMENSIONAL PACKING BASED ON EFFICIENT DECISION ENCODING METHODS AND TWO-LEVEL EVOLUTIONARY MEMORY 21

I.E. Moiseenko, S.P. Tarasov, I.I. Turulin
ANALYSIS OF STABILITY AND FEATURES OF PRACTICAL IMPLEMENTATION OF HOGENAUER FILTERS AS RECURSIVE DIGITAL FILTERS WITH FINITE IMPULSE RESPONSE 38

S.I. Klevtsov
FEATURES OF THE FORMATION OF THE PROCESS OF CLASSIFYING THE CONDITION OF A TECHNICAL FACILITY BASED ON THE ANALYSIS OF POINTS IN THE TIME SERIES OF THE PARAMETER 47

V.A. Chastikova, A.S. Bahtin, P.A. Merkulov
DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR INTEGRATING LARGE LANGUAGE MODELS INTO THE PROCESSES OF SECURITY OPERATIONS CENTERS 57

A.Yu. Yurchenko, M.Yu. Polenov
DISTRIBUTED SYSTEM FOR BARCODE RECOGNITION USING NEURAL NETWORKS 70

A.S. Zhuck
APPLICATION OF BACKPACK ALGORITHMS TO PREVENT UNAUTHORIZED EXCHANGE OF INFORMATION BETWEEN DIFFERENT LEVELS USERS IN THE HIERARCHICAL SYSTEM OF PROTECTION AGAINST UNAUTHORIZED ACCESS 80

SECTION II. DATA ANALYSIS, MODELING AND CONTROL

V.A. Kostyukov
METHOD OF SPATIAL-TEMPORAL DIVERSITY OF TRAJECTORIES OF A GROUP OF ROBOTS IN THE CONTEXT OF OBSTACLES 92

A.A. Bognyukov, D.Yu. Zorkin, I.A. Tarasova
USING PROJECT PLANNING TOOLS: GANTT CHART AND NETWORK DIAGRAM 102

A.B. Klimenko
A MODEL OF RESOURCES ALLOCATION INFORMATION PROCESS IN DYNAMIC DISTRIBUTED COMPUTING ENVIRONMENTS 111

S.I. Noskov, S.V. Belyaev
GROUPING PREDICTORS IN COMBINED PIECEWISE LINEAR REGRESSION 121

N.K. Poluyanovich, N.I. Svetlichnyi, O.V. Kachelaev, M.N. Dubyago
NEURAL NETWORK METHOD OF PREDICTIVE CONTROL IN MICROGRIDS WITH MECHATRONIC WIND-GENERATOR SYSTEM 128

F.A. Houssein, V.A. Kostyukov
DEVELOPMENT OF A METHOD FOR SOLVING THE PROBLEM OF TASK ALLOCATION IN A MULTI-AGENT SYSTEM 145

A.Yu. Taranov
METHODS FOR ASSESSING THE TEMPORAL STRUCTURE OF INTERNET DISCUSSIONS BASED ON THE NUMBER AND DURATION OF USER INTERACTIONS 155

A.N. Tselykh, V.S. Vasilev, L.A. Tselykh, S.A. Barkovskii
SOLUTION OF THE INVERSE PROBLEM OF SPECTRAL GRAPH THEORY IN THE ABSENCE OF OBSERVABLE VARIABLES 163

SECTION III. ELECTRONICS, NANOTECHNOLOGY AND INSTRUMENTATION

B.G. Konoplev
FEATURES OF LOW-VOLTAGE DIGITAL CIRCUITS BASED ON CMOS TECHNOLOGIES 90–20 NM 174

O.V. Afanaseva, T.F. Tulyakov
ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF TRADITIONAL AND MODERN TECHNOLOGIES FOR MONITORING POWER TRANSMISSION LINES 182

D.A. Bogdanets, V.I. Grishchenko, K.F. Kalmykova, A.I. Rakhmanov, D.S. Tsymbalov
THEORITICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF TOXICITY OF FLUE GASES OF A BURNER WITH COMBINED FLAME FORMATION 189

A.Y. Zvyagin, K.A. Boikov
EXPERIMENTAL SETUP BASED ON ANECHOIC CHAMBER FOR ACTIVE RADIOSENSORY TECHNICAL DIAGNOSTICS 201

A.I. Rybakov
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE EQUALIZER CONFIGURATION TO INCREASE NOISE IMMUNITY IN DECAMETER RADIO LINES 212

V.P. Fedosov, A.V. Tsirkulenko
STUDY OF THE STABILITY OF THE MIMO-OFDM SYSTEM TO ACTIVE INTERFERENCE USING AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR PROCESSING SPATIAL-TEMPORAL SIGNALS 228

SECTION IV. MACHINE LEARNING AND NEURAL NETWORKS

Z. Ahmad, Yu.A. Kravchenko, A.M. Mansour
OPTIMIZATION OF PID PARAMETERS OF SERVO SYSTEMS USING A GENETIC ALGORITHM AND A NEURAL NETWORK CLASSIFIER 237

M.A. Lapina, D.A. Lukyanov, V.G. Lapin, N.N. Kucherov
RESEARCH OF MACHINE LEARNING METHODS FOR DETECTING FRAUDULENT WEBSITES 251

M.A. Khapova, K.Ch. Bzhikhatlov, L.B. Kokova
DEVELOPMENT OF AN AUTONOMOUS ROBOT TO PERFORM THE FUNCTIONS OF A SALES - CONSULTANT IN RETAIL NETWORKS 263

I.S. Fomin, V.D. Matveev, A.E. Arkhipov
SPIKING REPRESENTATIONS COMPARISON FOR LOCALIZATION AND NAVIGATION IN THE KEYFRAME MAP 273

S.S. Obaid, V.A. Pogonin, I.B. Kirina
INTEGRATION OF A RECURRENT NEURAL NETWORK TO INCREASE THE FAILURE TOLERANCE OF THE MOISTURE TRANSFER MODEL IN THE SMART GARDEN SYSTEM 284

Раздел I. Алгоритмы обработки информации

УДК 681.3 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-6-20

А.В. Болгак, Э.И. Ватутин, Д.А. Трокоз

ОЦЕНКА ВРЕМЕННЫХ ЗАТРАТ НА УМНОЖЕНИЕ КВАДРАТНЫХ БИНАРНЫХ МАТРИЦ УСТРОЙСТВА С КОНВЕЙЕРИЗАЦИЕЙ ЧТЕНИЯ ДАННЫХ ИЗ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ МНОГОПОРТОВОЙ ПАМЯТИ

Целью данной работы является оценка временных затрат на умножение квадратных бинарных матриц размером $n \times n$ устройства с конвейеризацией операции чтения данных из специализированной многопортовой памяти и ее сравнение с временными затратами прототипа. В данной работе использовались методы математической логики, теории множеств и графов, дискретных систем и устройств ЭВМ, теории проектирования конечных автоматов. В результате исследования было показано, что использование конвейеризации операции чтения данных из специализированной многопортовой памяти позволяет снизить временные затраты на обработку квадратных бинарных матриц размером $n \leq 2048$ до 206,3 раза. Из полученных данных видно, что время загрузки и выгрузки исходных и результирующих данных для предложенного устройства существенно выше времени умножения матриц, ввиду чего частые загрузки и выгрузки матриц нецелесообразны. Например, при выполнении операции транзитивного замыкания бинарного отношения, представленного в виде бинарной матрицы, производится однократная загрузка исходной матрицы с последующей серией ее возведения в квадрат, что эффективно реализуется предложенным устройством. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что предложенное устройство для умножения квадратных бинарных матриц с конвейеризацией операции чтения данных из специализированной многопортовой памяти обеспечивает существенный выигрыш во времени обработки и умножения квадратных бинарных матриц по сравнению с прототипом. Кроме того, результаты показали, что частые загрузки и выгрузки матриц нецелесообразны для предложенного устройства с конвейеризацией операции чтения из специализированной многопортовой памяти, так как затрачиваемое время на загрузку и выгрузку исходных и результирующих данных существенно превышает время на операцию умножения матриц.

Умножение матриц; транзитивное замыкание; оценка быстродействия; многопортовая специализированная память; специализированные вычислительные устройства; систолические вычислительные устройства.

A.V. Bolgak, E.I. Vatutin, D.A. Trokoz

ESTIMATION OF TIME SPENT ON MULTIPLICATION OF SQUARE BINARY MATRICES OF A DEVICE WITH PIPELINING OF DATA READING FROM SPECIALIZED MULTIPORT MEMORY

The purpose of this work is to estimate the time costs for multiplying square binary matrices of size $n \times n$ by a device with pipelining the operation of reading data from a specialized multiport memory and compare it with the time costs of the prototype. This work used methods of mathematical logic, set and graph theory, discrete systems and computer devices, and finite state machine design theory. As a result of the study, it was shown that the use of pipelining the operation of reading data from specialized multiport memory reduces the time spent on processing square binary matrices with a size of $n \leq 2048$ up to 206.3 times. It can be seen from the data obtained that the loading and unloading time of the source and result data for the proposed device is significantly higher than the matrix multiplication time, which makes frequent loading and unloading of matrices impractical. For example, when performing the operation of transitive closure of a binary relation represented as a binary matrix, the initial matrix is loaded once, followed by a series of squaring, which is effectively implemented by the proposed device. Based on the obtained results, it can be concluded that the proposed device for multiplying square binary matrices with

pipelining the operation of reading data from a specialized multiport memory provides a significant gain in the time of processing and multiplying square binary matrices compared to the prototype. In addition, the results showed that frequent loading and unloading of matrices is impractical for the proposed device with pipelining the operation of reading from a specialized multiport memory, since the time spent on loading and unloading the original and resulting data significantly exceeds the time for the matrix multiplication operation.

Matrix multiplication; transitive closure; performance evaluation; multiport specialized memory; specialized computing devices; systolic computing devices.

Введение. Умножение матриц – это одна из задач, решение которой позволяет эффективно задействовать основные вычислительные ресурсы современных процессоров и графических ускорителей, тем самым, увеличивая реальную производительность и уменьшая временные затраты на решение поставленной задачи за счет алгоритмической и высокоуровневой оптимизации соответствующей программной реализации.

Существует базовый подход умножения матриц – классическое умножение, которое реализуется в соответствии с известной формулой:

$$c_{ij} \quad \sum_{k=1}^{N} a_{ik} b_{kj},\ i,\ j = \overline{1, N}.$$

Данный подход достаточно прост, однако неэффективен, когда размер матриц превышает объем кэш-памяти процессора. Любая практическая реализация умножения матриц требовательная к темпу поступления данных из памяти [1], в связи с этим, на практике применяются различные методы, позволяющие увеличить темп поступления данных из памяти. Например, на процессорах (CPU) блочное умножение матриц позволяет разбить большие матрицы на меньшие блоки, которые помещаются в кэш-память, что минимизирует количество обращений к основной памяти [2–4]. Стоит отметить, что на процессорах с поддержкой векторных расширений системных команд (SSE) также существуют специализированные программные реализации, которые также позволяют повысить эффективность использования кэш-памяти процессора в совокупности с выполнением нескольких арифметических действий параллельно во времени в соответствии с принципом SIMD.

Другим направлением для снижения времени выполнения матричного умножения является умножение матриц на графических процессорах (GPU) в рамках концепции GPGPU. Использование параллельных алгоритмов, таких как алгоритмы на основе технологий CUDA, OpenCL, STREAM для GPU [5–8] позволяет значительно ускорить выполнение умножения матриц.

Помимо вышеперечисленных, существует множество алгоритмических подходов, направленных на снижение временных затрат на умножение матриц. Например, алгоритмы умножения матриц Штрассена [9], Копперсмита-Винограда [10], отличительной особенностью которых является более низкая временная асимптотика, но, несмотря на это, практический выигрыш от их использования наблюдается на матрицах значительно большего размера (миллионы элементов).

В случае, если на программном уровне время выполнения операции умножения матриц оказывается неприемлемо долгим, то возможен перенос данной операции с программного уровня на аппаратный путем разработки специализированного вычислительного устройства. На аппаратном уровне существует несколько подходов к реализации умножения матриц. Они могут быть разделены на три основные группы:

1. Оптические устройства [11, 12]. Устройства данной группы используют оптические элементы для выполнения операций умножения. Несмотря на их теоретическую привлекательность, в настоящее время они не используются на практике.

2. Вероятностные устройства [13]. Эти устройства имеют встроенные вероятностные свойства и могут допускать статистическую погрешность. Несмотря на то, что они могут предлагать высокую производительность, несоответствие стандартам IEEE 754 и низкая точность ограничивают их применение в практических задачах.

3. Цифровые устройства с параллельно-конвейерной архитектурой [14–18]. На сегодняшний день эта группа является наиболее распространенной. Устройства, основанные на принципах параллельной и конвейерной обработки, позволяют эффективно выполнять умножение матриц. Примеры таких устройств включают умножители Брауна, Бута и Бо-Вули и другие, которые реализуют различные архитектурные подходы к выполнению операций над матрицами.

Существует отдельный класс задач, направленный на обработку бинарных матриц. К ним, например, относятся задачи построения матриц достижимости и контрдостижимости в графах [19], поиска транзитивного замыкания бинарного отношения [20–22]. В случае их аппаратной реализации удается значительно снизить аппаратную сложность и повысить быстродействие соответствующих специализированных вычислительных устройств. Данные устройства можно разделить на два направления: на базе систолических структур [23, 24] и итерационные устройства [25]. Вычислительные устройства с систолической структурой характеризуется высоким быстродействием, однако они обладают существенно большей аппаратной сложностью, являющейся препятствием для их практической реализации при умножении матриц большого размера. Итерационные устройства умножения бинарных матриц характеризуются умеренным быстродействием и низкой аппаратной сложностью. Также при реализации операции умножения бинарных матриц процесс умножения строки на столбец может быть досрочно прерван в случае получения единичного значения на одной из промежуточных итераций, что может быть использовано для снижения затрат вычислительного времени в случае умножения разряженных бинарных матриц. Данная особенность может быть эффективно реализована на практике только в составе устройств на базе аппаратной реализации алгоритмов классического умножения матриц с возможностью параллельной обработки информации.

В каждом конкретном случае (размер матриц, плотность матриц, ограничение на аппаратную сложность устройства) возможен выбор одного из перечисленных выше программных или аппаратных подходов к реализации операции умножения матриц на практике.

Одним из примеров систолических устройств, взятых за основу для дальнейшей доработки, является устройство для матричных операций [26]. При его работе умножение матриц возможно за линейное время, однако, на каждом такте работы ему требуется поступление $2n$ коэффициентов перемножаемых матриц, что невозможно при использовании классической памяти и требует разработки специализированной многопортовой памяти с n портами чтения, что было предложено в устройстве [23]. Кроме того, при обработке бинарных матриц возможно существенное снижение аппаратной сложности и повышение быстродействия за счет сокращения разрядности обрабатываемых данных с нескольких байт до одного бита, что было реализовано в устройстве [24]. Дальнейшие расчеты [27] показали, что при использовании специализированной многопортовой памяти предложенной архитектуры достигается снижения времени обработки, однако для матриц размером $n > 64$ время обработки по прежнему лимитируется темпом поступления данных из памяти, а не временем работы систолической операционной части.

Исходя из вышесказанного, с целью снижения временных затрат на чтение данных из многопортовой памяти предложено устройство, основанное на систолическом принципе умножения, отличительной особенностью которого является конвейеризация чтения данных.

Основное внимание в данной статье уделяется оценке временных затрат устройства для умножения бинарных матриц размером $n \times n$ и их сопоставление с известными программными и аппаратными реализациями, перечисленными выше.

Материалы и методы. При программной обработке матрица хранится в оперативной памяти в виде двумерного массива бинарных значений, элементы матрицы располагаются в памяти подряд, для обращения к элементу матрицы требуется вычисление адреса. При аппаратно-ориентированной обработке данные передаются из оперативной памяти в специализированную многопортовую память устройства. Матрицы подаются в операционную часть систолического устройства в направлении сверху-вниз для одной мат-

рицы и слева-направо для другой, где за линейное время производится их умножение. На рис. 1 приведена функциональная схема предложенного устройства, на рис. 2 – схема операционного блока устройства, на рис. 3 – схема блока хранения одной ячейки памяти (специализированная конвейерная многопортовая память), на рис. 4 – схема блока коэффициентов матрицы (одна ячейка для хранения одного коэффициента матрицы в рамках многопортовой памяти).

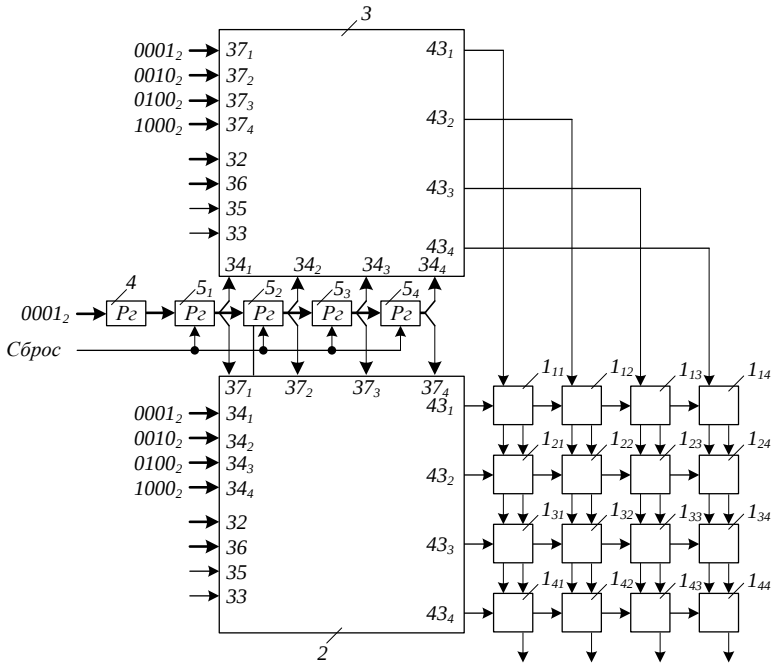


Рис. 1. Функциональная схема предложенного устройства

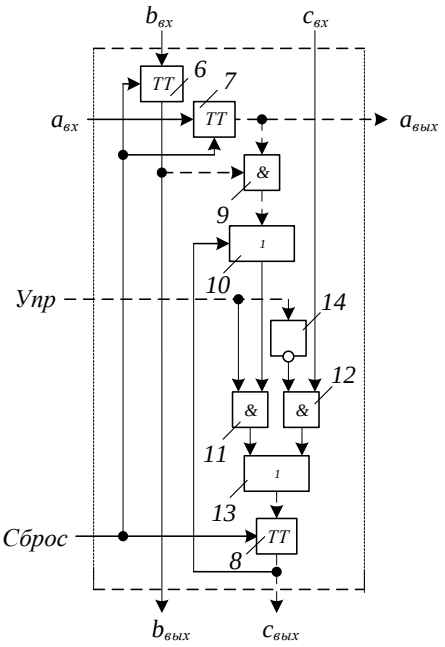


Рис. 2. Схема операционного блока предложенного устройства

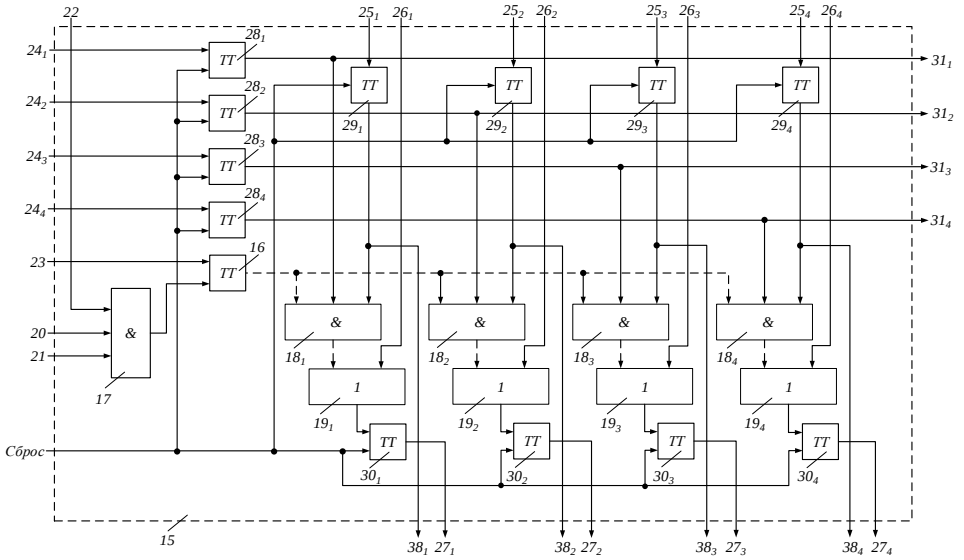


Рис. 3. Схема блока хранения предложенного устройства

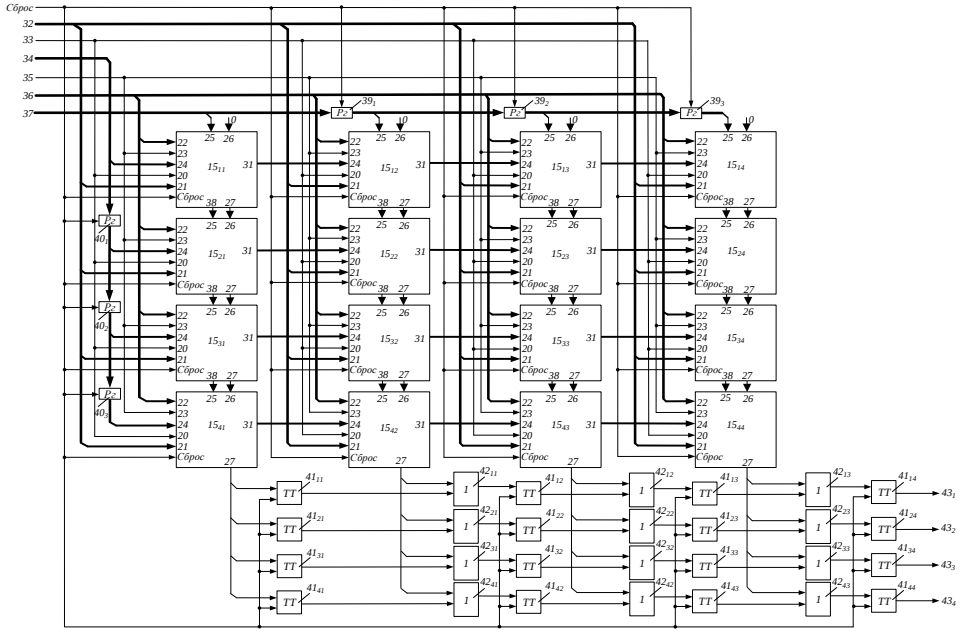


Рис. 4. Схема блока коэффициентов матрицы предложенного устройства

Перед началом работы устройства выполняется подача сигнала сброса значений на входы всех регистров и триггеров устройства, что обеспечивает их установку в ноль. На вход данных подается единичное значение. После выполнения инициализации устройства исходные данные (коэффициенты) умножаемых матриц A и B поочередно загружаются в блоки коэффициентов матриц 2 и 3 (рис. 1) внешним устройством, загрузка элементов первой и второй матриц может быть совмещена во времени. Далее выполняется умножение двух матриц и чтение следующей порции данных. После получения результирующей матрицы C происходит её выгрузка из специализированной многопортовой памяти устройства в оперативную память. Выгрузка осуществляется в конвейерном режиме.

В общем случае, кроме непосредственно времени умножения, необходимо учитывать время загрузки исходных данных и время возврата результата, для чего определяющим фактором является пропускная способность шины, обеспечивающая связь специализированного устройства и оперативной памяти (контроллера прямого доступа в память).

Результаты и их обсуждение. Выполним оценку предлагаемого устройства с точки зрения временных затрат на умножение квадратных бинарных матриц. Время работы устройства напрямую будет зависеть от времени работы каждого отдельного этапа и определяется как

$$t_{общ} = t_{зап} + t_{ин} + t_{раб} + t_{выгр},$$

где $t_{зап}$ – время передачи данных из оперативной памяти в память устройства; $t_{ин}$ – время инициализации устройства; $t_{раб}$ – время обработки данных; $t_{выгр}$ – время передачи данных из памяти устройства в оперативную память.

При реализации операции записи сигналу со входа 23 (рис. 3) данных записи необходимо переключить триггер 16 (необходимое время – $2t$, где t – время работы одного эквивалентного вентиля) по приходу синхросигнала, которому требуется пройти через трехвходовой элемент И 17 (необходимое время – $2t$). Таким образом, общее время записи одного блока хранения 15 составляет

$$t_{зап} = \underbrace{2t}_{TT\,16} \quad \underbrace{2t}_{И\,17} \quad 4t .$$

На этапе загрузки исходных данных значения a_{ij}, $i, j = \overline{1, n}$ элементов первой матрицы подаются поочередно. С учетом того, что время записи одного блока хранения 15 составляет $4t$, общее время последовательной загрузки данных одной матрицы, включающей в своем составе n n блоков хранения 15, составляет $4t_0n^2$. Аналогичное время требуется для загрузки данных второй матрицы, а общее время загрузки составляет $t_{зап} = 8t_0n^2$.

На этапе инициализации устройства производится сброс значений группы двухступенчатых регистров 5, триггеров 6, 7, 8, групп триггеров 28, 29, 3 , групп двухступенчатых регистров 39, 4 , группы триггеров 41, на что требуется время $t_{ин} = 2t_0$.

Этап работы устройства включает в своем составе $(2n – 1)$ итерацию. На каждой итерации операционная часть работает как группа линейных синхронных конвейеров под управлением общего синхросигнала. Конвейерный такт t_k определяется максимумом из времени чтения данных из специализированной памяти и времени работы операционного блока 1:

$$t_k = \max (t_{k\,чт}, t_{k\,ОБ}).$$

В начале работы адрес строки с одного из входов 34 (рис. 4) адресов строк чтения блока коэффициентов матрицы записывается в первую ступень двухступенчатого регистра 4 $_1$ и с входа 24 в первую ступень группы триггеров $28_1 – 28_n$ блока хранения 15_{11}, на что затрачивается время $2t$, параллельно с этим адрес столбца с одного из входов 37 адресов строк чтения блока коэффициентов матрицы записывается в первую ступень двухступенчатого регистра 39_1 с входа 25 в первую ступень группы триггеров $29_1 – 29_n$ блока хранения 15_{11}, далее данные переписываются из первых во вторые ступени группы триггеров 3 $_1 – 30_n$, на что затрачивается время $2t$.

Далее производится запись информации из вторых ступеней двухступенчатых регистров 4 $_{i-1}$ в первые ступени регистров 4 $_i$ и из вторых ступеней двухступенчатых регистров 39_{i-1} в первые ступени регистров 39_i, где $i = \overline{2, n}$, на что затрачивается время $2t_0$, и из вторых ступеней триггеров $28_1 – 28_n$ блоков хранения 15_{ij} в первые ступени триггеров $28_1 – 28_n$ блоков хранения $15_{i, j+1}$, где $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n – 1}$, и из вторых ступеней триггеров $29_1 – 29_n$ блоков хранения 15_{ij} в первые ступени триггеров $29_1 – 29_n$ блоков хранения $15_{i+1, j}$, где $i = \overline{1, n – 1}$, $j = \overline{1, n}$, на что затрачивается время $2t_0$.

Далее сигналы с выходов вторых ступеней групп триггеров $28_1 – 28_n$ и $29_1 – 29_n$ открывают трехвходовые элементы И $18_1 – 18_n$ (необходимое время – $2t_0$) для прохождения сигнала с выхода триггера 16 на входы элементов ИЛИ 19 (необходимое время – t) и затем записывается в первую ступень группы триггеров 3 , на что затрачивается время $2t$.

Параллельно с записью информации во вторые ступени двухступенчатых регистров 39, 4 и триггеров 28, 29 выполняется прохождение сигнала через элементы ИЛИ 42 (необходимое время – t), далее запись информации в первую ступень триггеров 41 (необходимое время – $2t_0$) и затем запись информации из первой ступени во вторую триггеров 41 (необходимое время – $2t_0$).

Временная диаграмма, поясняющая этап работы предложенного устройства приведена на рис. 5.

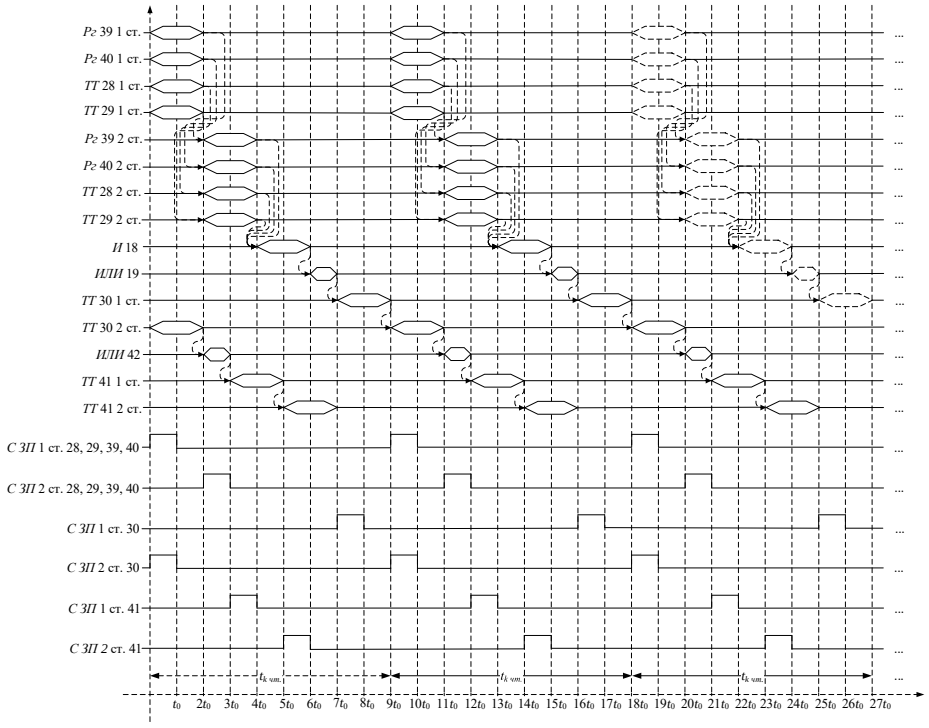


Рис. 5. Временная диаграмма, поясняющая логику работы предложенного устройства

Время чтения порции данных из памяти в конвейерном режиме составляет

$$t_{k\ чт.} = \max\Big(\underbrace{2t}_{\substack{Рг\,39\\1\ ст.}},\ \underbrace{2t}_{\substack{Рг\,4\\1\ ст.}},\ \underbrace{2t}_{\substack{ТТ\,28\\1\ ст.}},\ \underbrace{2t}_{\substack{ТТ\,29\\1\ ст.}},\ \underbrace{2t}_{\substack{ТТ\,3\\2\ ст.}}\Big) + \max\Big(\max\Big(\underbrace{2t}_{\substack{Рг\,39\\2\ ст.}},\ \underbrace{2t}_{\substack{Рг\,4\\2\ ст.}},\ \underbrace{2t}_{\substack{ТТ\,28\\2\ ст.}},\ \underbrace{2t}_{\substack{ТТ\,29\\2\ ст.}}\Big) + \underbrace{2t}_{И\,18} + \underbrace{t}_{ИЛИ\,19} + \underbrace{2t}_{\substack{ТТ\,3\\1\ ст.}},$$

$$\underbrace{t}_{ИЛИ\,42} + \underbrace{2t}_{\substack{ТТ\,41\\1\ ст.}} + \underbrace{2t}_{\substack{ТТ\,41\\2\ ст.}}\Big) = 2t_0 + \max(7t_0, 5t_0) = 9t_0.$$

Во время работы ячейки операционного блока устройства обработки бинарных матриц на базе систолических структур (рис. 2) сигнал $a_{вх}$ проходит через двухступенчатый триггер 7 за время $4t$, параллельно с этим, сигнал $b_{вх}$ аналогично проходит через двухступенчатый триггер 6. Изначально запись сигналов $a_{вх}$ и $b_{вх}$ происходит в первую ступень триггеров 6 и 7, соответственно, за время $2t$. Далее, сигналы переходят на вторую ступень данных триггеров, за время равное $2t$.

Наиболее длинный путь, возникающий при прохождении сигнала через логические элементы по схеме операционного блока 1, представлен элементами: триггеры 6, 7, 8, элементы И 9, 11, элементы ИЛИ 1 , 13, на что необходимо время

$$t_{k\ ОБ} = \max\Big(\underbrace{4t}_{ТТ\,6},\ \underbrace{4t}_{ТТ\,7}\Big) + \underbrace{t}_{И\,9} + \underbrace{t}_{ИЛИ\,1} + \underbrace{t}_{И\,11} + \underbrace{t}_{ИЛИ\,13} + \underbrace{2t}_{ТТ\,8} = 10t_0,$$

запись во вторую ступень триггера 8 производится параллельно с записью в первые ступени триггеров 6 и 7, поясняющая временная диаграмма приведена на рис. 6.

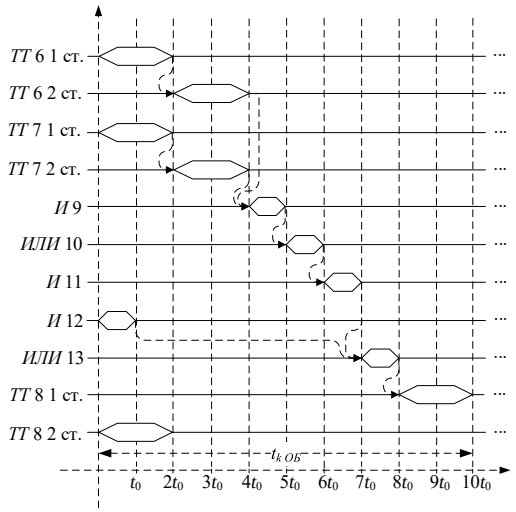


Рис. 6. Временная диаграмма, поясняющая работу операционного блока предложенного устройства

Конвейерный такт может быть определен как

$$t_k = \max\,(9t_0,\, 10t_0) = 10t_0.$$

Время обработки данных $t_{раб} = t_k \quad (2n - 1)$ ввиду того, что при выбранном алгоритме умножения матриц подача коэффициентов производится за $(2n - 1)$ итерацию. Исходя из этого, время обработки данных составляет

$$t_{раб} = 10t_0 \quad (2n - 1) = 20t_0n - 10t_0 = (20n - 10)\,t_0.$$

На этапе получения результата происходит выгрузка данных, хранящихся в триггерах 8 операционных блоков 1. Выгрузка происходит в конвейерном режиме: перемещение данных между ступенями триггеров 8 занимает время, равное $4t$, через каждый из элементов И 12 и ИЛИ 13 – t , общее время – $6t_0$. Для перемещения данных операционных блоков 1 верхнего ряда требуется n итераций. На каждой итерации производится выгрузка n коэффициентов, следовательно, $t_{выгр} = 6t_0n^2$.

Общее время работы устройства определяется как

$$t_{общ} = 8t_0n^2 + 2t_0 + 10t_0 \quad (2n - 1) + 6t_0n^2 = 14t_0n^2 + 2t_0 + 20t_0n - 10t_0 = (14n^2 + 20n - 8)\,t_0.$$

Оценим временные затраты прототипа [24] на умножение бинарных матриц.

Время работы прототипа определяется как

$$t_{общ.\ прот.} = t_{зап.\ прот.} + t_{ин.\ прот.} + t_{раб.\ прот.} + t_{выгр.\ прот.},$$

где $t_{зап.\ прот.}$ – время передачи данных из оперативной памяти в память устройства; $t_{ин.\ прот.}$ – время инициализации устройства; $t_{раб.\ прот.}$ – время обработки данных; $t_{выгр.\ прот.}$ – время передачи данных из памяти устройства в оперативную память.

Время загрузки данных, время инициализации, время работы операционных блоков и время выгрузки результата совпадают у предложенного устройства и прототипа:

$$t_{зап.\ прот.} = t_{зап};$$

$$t_{ин.\ прот.} = t_{ин};$$

$$t_{k\ ОБ\ прот.} = t_{k\ ОБ};$$

$$t_{выгр.\ прот.} = t_{выгр}.$$

Этап работы прототипа включает в своем составе $(2n - 1)$ итерацию. На каждой итерации операционная часть работает как группа линейных синхронных конвейеров под управлением общего синхросигнала. Конвейерный такт определяется максимумом из времени чтения данных из специализированной памяти и времени работы операционного блока 1:

$$t_{k\ прот.} = \max\,(t_{k\ чт.\ прот.},\, t_{k\ ОБ\ прот.}).$$

При чтении данных сигнал с выхода триггера 16 (рис. 7) проходит через один из трехвходовых элементов И 18, на что затрачивается время $2t_0$ (все элементы И 18 в составе блоков хранения работают параллельно), через один из двухвходовых элементов ИЛИ 19, на что затрачивается время t_0 и через n-входовой элемент ИЛИ 34 (рис. 8), на что с использованием пирамидальной схемы из двухвходовых элементов необходимо время $\lceil {}_2 n \rceil t$, где $\lceil x \rceil$ – операция округления вверх. Таким образом, общее время чтения данных составляет

$$t_{чт.\ прот.} = 2t_0 + t_0 n + \lceil {}_2 n \rceil t \ .$$

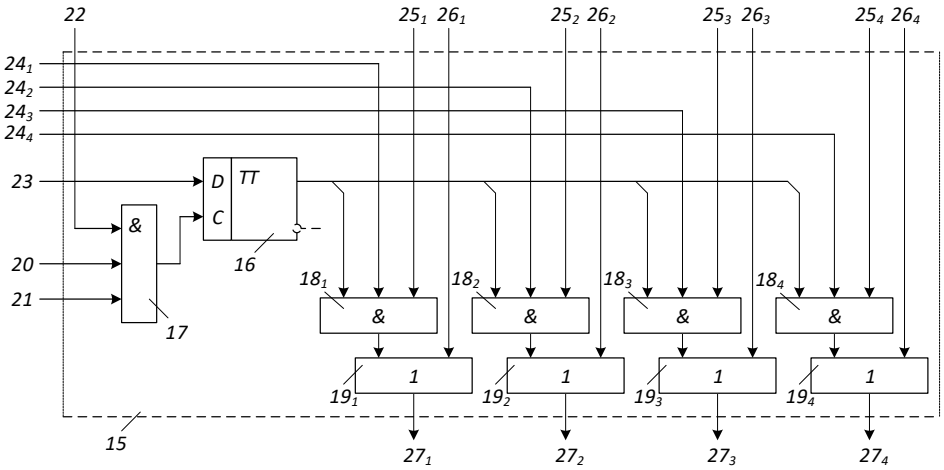


Рис. 7. Схема блока хранения прототипа

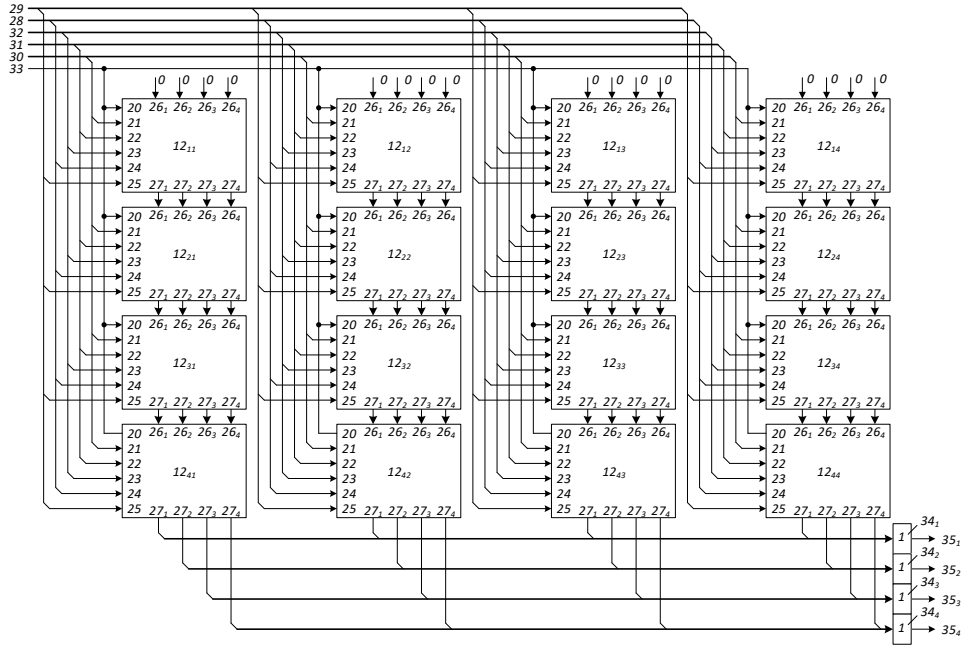


Рис. 8. Схема блока коэффициентов матрицы прототипа

Конвейерный такт может быть определен как

$$t_{k\ прот.} = \max\ (10t_0,\ 2t_0 + t_0 n + \lceil\ \ _2 n \rceil t\ ).$$

Для практически важных случаев ($n > 4$)

$$t_{k\ прот.} = 2t_0 + t_0 n + \lceil\ \ _2 n \rceil t\ ,$$

т.е. время работы прототипа лимитируется темпом поступления входных данных из специализированной многопортовой памяти. Время обработки данных $t_{раб.\ прот.} = t_{k\ прот.}\ \ (2n - 1)$ ввиду того, что при выбранном алгоритме умножения матриц подача коэффициентов производится за $(2n - 1)$ итерацию и составляет

$$t_{раб.\ прот.} = 2t_0 + t_0 n + \lceil\ \ _2 n \rceil t\ \ (\ 2n - 1) = 4t_0 n + 2t_0 n^2 + 2n\lceil\ \ _2 n \rceil t\ - 2t_0 - t_0 n - \lceil\ \ _2 n \rceil t\ = 2t_0 n^2 + 3t_0 n - 2t_0 + 2n\lceil\ \ _2 n \rceil t\ - \lceil\ \ _2 n \rceil t\ .$$

Общее время работы прототипа определяется как

$$t_{общ.\ прот.} = 8t_0 n^2 + 2t_0 + (2t_0 n + t_0 n + \lceil\ \ _2 n \rceil t\ )\ \ (\ 2n - 1) + 6t_0 n^2 = 14t_0 n^2 + 2t_0 + 4t_0 n + 2t_0 n^2 + 2n\lceil\ \ _2 n \rceil t\ - 2t_0 - t_0 n - \lceil\ \ _2 n \rceil t\ = 14t_0 n^2 + 2t_0 n^2 + 3t_0 n + 2n\lceil\ \ _2 n \rceil t\ - \lceil\ \ _2 n \rceil t\ = (16n^2 + 3n + 2n\lceil\ \ _2 n \rceil - \lceil\ \ _2 n \rceil)\ t_0.$$

Проведем сравнение временных затрат двух устройств при одинаковых n.

Выигрыш во времени обработки определяется как

$$\eta = \frac{t_{общ.\ прот.}}{t_{общ.}} \qquad \frac{16n^2\ \ 3n\ \ 2n\lceil\ \ _2 n \rceil - \lceil\ \ _2 n \rceil}{14n^2\ \ 2\ \ n - 8}.$$

Значения временных затрат каждого этапа работы для предложенного устройства и прототипа, рассчитанные для различных n, $t_0 = 1$ *нс* приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения временных затрат каждого этапа работы устройств

n	$t_{зап}$, *мс*	$t_{зап.\ прот.}$, *мс*	$t_{раб}$, *мс*	$t_{раб.\ прот.}$, *мс*	$t_{выгр}$, *мс*	$t_{выгр.\ прот.}$, *мс*	$t_{общ.\ прот.}$, *мс*	$t_{общ}$, *мс*
2	0,000032		0,00003	0,000015	0,000024		0,000073	0,000088
4	0,000128		0,00007	0,000056	0,000096		0,000282	0,000296
8	0,000512		0,00015	0,000195	0,000384		0,00109	0,00104
16	0,00205		0,00031	0,00068	0,00154		0,00427	0,00389
32	0,00819		0,00063	0,00245	0,00614		0,0168	0,0149
64	0,0327		0,00127	0,00914	0,0246		0,0664	0,0586
128	0,131		0,00255	0,0349	0,0983		0,264	0,232
256	0,524		0,00511	0,135	0,393		1,05	0,922
512	2,09		0,0102	0,535	1,57		4,21	3,68
1024	8,39		0,0204	2,12	6,29		16,8	14,7
2048	33,5		0,0409	8,44	25,2		67,1	58,7

Сравнительная оценка временных затрат на работу предложенного устройства и прототипа, рассчитанная для различных n, $t_0 = 1$ *нс* приведена в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительная оценка временных затрат на работу устройств

n	$t_{общ.\ прот.}$, *мс*	$t_{общ}$, *мс*	Выигрыш	
			Раз	**%**
8	0,00109	0,00104	1,04	4
16	0,00427	0,00389	1,10	10
32	0,0168	0,0149	1,12	12
64	0,0664	0,0586	1,13	13
128	0,264	0,232	1,14	14
256	1,05	0,922	1,14	14
512	4,21	3,68	1,14	14
1024	16,8	14,7	1,14	14
2048	67,1	58,7	1,14	14

Значения временных затрат для предлагаемого устройства и прототипа, рассчитанные для различных n, $t_0 = 1$ *нс* приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительная оценка временных затрат устройств на умножение матриц

n	Предложенное устройство	Устройство-прототип [24]	Выигрыш, *раз*
8	150 *нс*	190 *нс*	1,3
16	310 *нс*	680 *нс*	2,2
32	630 *нс*	2450 *нс*	3,9
64	1,27 *мкс*	9,14 *мкс*	7,2
128	2,55 *мкс*	34,9 *мкс*	13,7
256	5,11 *мкс*	135 *мкс*	26,4
512	0,0102 *мс*	0,535 *мс*	52,4
1024	0,0204 *мс*	2,12 *мс*	103,9
2048	0,0409 *мс*	8,44 *мс*	206,3

Оценка временных затрат устройств на умножение матриц, рассчитанная для различных n, $t_0 = 1$ *нс* приведена в табл. 4.

Таблица 4

Оценка временных затрат вычислительных устройств на умножение матриц

n	Intel Core i5-11400 [4]	Intel Core i7-4770 [28]	Intel Core i7-4770 (SSE) [29-30]	NVIDIA GeForce 770 GT [7]	Устройство-аналог [23]	Устройство-аналог [25]	Устройство-прототип [24]	Предложенное устройство
8	330 *нс*	–	–	–	145000 *нс*	3900 *нс*	190 *нс*	150 *нс*
16	2870 *нс*	–	1321,3 *нс*	–	145000 *нс*	24300 *нс*	680 *нс*	310 *нс*
32	28250 *нс*	–	9637,6 *нс*	–	145000 *нс*	175000 *нс*	2450 *нс*	630 *нс*
64	300 *мкс*	–	58,2 *мкс*	–	198 *мкс*	1314 *мкс*	9,14 *мкс*	1,27 *мкс*
128	2600 *мкс*	–	419,4 *мкс*	–	391 *мкс*	10073 *мкс*	34,9 *мкс*	2,55 *мкс*
256	23600 *мкс*	14000 *мкс*	3078 *мкс*	55000 *мкс*	776 *мкс*	81400 *мкс*	135 *мкс*	5,11 *мкс*
512	194,5 *мс*	104 *мс*	22,7 *мс*	75 *мс*	1,54 *мс*	656,3 *мс*	0,535 *мс*	0,0102 *мс*
1024	1603 *мс*	850 *мс*	238,6 *мс*	210 *мс*	3,08 *мс*	4895 *мс*	2,12 *мс*	0,0204 *мс*
2048	13318 *мс*	7000 *мс*	2454,3 *мс*	1300 *мс*	6,15 *мс*	39068 *мс*	8,44 *мс*	0,0409 *мс*

Заключение. Из представленных расчетов можно сделать вывод о том, что использование конвейеризации операции чтения данных из специализированной многопортовой памяти позволяет снизить временные затраты на обработку квадратных бинарных матриц размером $n \leq 2$ 48 до 2 6,3 раза. Из данных табл. 1 видно, что время загрузки и выгрузки исходных и результирующих данных для предложенного специализированного вычислительного устройства существенно выше времени умножения матриц, ввиду чего частые загрузки и выгрузки матриц нецелесообразны. Например, при выполнении операции транзитивного замыкания бинарного отношения, представленного в виде бинарной матрицы, производится однократная загрузка исходной матрицы с последующей серией ее возведения в квадрат, что эффективно реализуется предложенным специализированным вычислительным устройством.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Штейнберг Б.Я.* Блочно-рекурсивное параллельное перемножение матриц // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, № 10. – С. 33-41.
2. *Кожин А.С, Недбайло Ю.А.* Методы оптимизации времени доступа в общий кэш многоядерного микропроцессора // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 3. – С. 27-32.
3. *Егунов В.А.* О влиянии кэш-памяти на эффективность программной реализации базовых операций линейной алгебры // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2018. – № 3. – С. 88-96.
4. *Болгак А.В., Ватутин Э.И.* Оценка реальной производительности процессоров семейства Inte C re различных поколений в задаче умножения вещественных матриц для однопоточной программной реализации // Облачные и распределенные вычислительные системы в электронном управлении. ОРВС – 2023: Сб. трудов 4-й международной научно-технической конференции (28 ноября – 1 декабря 2 23 года) / ред. кол.: И.И. Курочкин [и др.]; ИПС РАН. Переславль-Залесский. – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга». – 2024. – С. 98-100.
5. *Старовойтов И.Н., Ревняков Е.Н., Полякова Е.Н.* Параллельные вычисления на графических процессорах // Первая Международная научная конференция по проблемам цифровизации: EDCRUNCH URAL – 2020: Матер. конференции (Екатеринбург, 29–3 сентября 2 2 г.); М-во науки и высш. образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. – С. 314-319.
6. *Тумаков Д.Н., Чикрин Д.Е., Егорчев А.А., Голоусов С.В.* Технология программирования CUDA: учеб. пособие. – Казань: Казанский государственный университет, 2017. – 112 с.
7. *Ватутин Э.И., Мартынов И.А., Титов В.С.* Оценка реальной производительности современных видеокарт с поддержкой технологии CUDA в задаче умножения матриц // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2014. – № 2. – С. 8-17.
8. *Боресков А.В., Харламов А.А. Марковский Н.Д. и др.* Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA. – М.: Изд-во Московского университета, 2012. – 336 с.
9. *Volker S.* Gaussian Elimination is not Optimal // Numerische Mathematik. – Springer Science+Business Media, 1969. – Vol. 13, Iss. 4. – P. 354-356.
10. *Don C., Shmuel W.* Matrix Multiplication via Arithmetic Progressions // Journal of Symbolic Computation. – 1990. – P. 251-280.
11. *Юшин А.М.* Справочник. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги. – М.: Изд-во «РадиоСофт»2000. – Т. 1. – 512 с.
12. *Белов П.А., Беспалов В.Г., Васильев В.Н., Козлов С.А., Павлов А.В., Симовский К.Р., Шполянский Ю.А.* Оптические процессоры: достижения и новые идеи // В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – СПб, 2 6. – С. 6-36.
13. *Плаксиенко В.С., Плаксиенко Н.Е., Плаксиенко С.В*. Устройства приема и обработки сигналов: учеб. пособие для вузов. – М.: Учебно-методический издательский центр «Учебная литература», 2004. – 376 с.
14. *Лобач В.Т., Потипак М.В.* Основы проектирования цифровых устройств радиоэлектронных систем: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – 14 с.
15. *Сырямкин В.И.* Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции: Сб. материалов IV Международного форума, г. Томск, 15-16 декабря 2 21 г. – Томск: STT, 2022. – 1 4 с.
16. *Одинец А.И., Науменко А.П.* Цифровые устройства: АЦП и ЦАП: учеб. пособие. – Омск: Изд-во ИРСИД, 2006. – 48 с.
17. *Gümüşkaya Haluk, Örencik Bülent.* A parallel pipelined computer architecture for digital signal processing // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. – 1998. – Vol. 6, No. 2. – Article 4. – P. 107-130.

18. *Строгонов А.В.* Основы цифровой обработки сигналов. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014.
19. *Зыков А.А.* Основы теории графов. – М.: Наука, 1986. – 384 с.
20. *Ватутин Э.И., Зотов И.В.* Построение матрицы отношений в задаче оптимального разбиения параллельных управляющих алгоритмов // Известия Курского государственного технического университета. – 2004. – № 2. – С. 85-89.
21. *Алескеров Ф.Т., Хабина Э.Л., Шварц Д.А., Егорова Л.Г.* Бинарные отношения, графы и коллективные решения. Примеры и задачи: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во Юрайт, 2021. – 458 с.
22. *Бобонова Е.Н.* Методы математической обработки данных: учеб. пособие. – М.; Вологда: Инфра-инженерия, 2024. – 116 с.
23. Патент РФ на полезную модель № 157948. Устройство для умножения матриц / *Мартынов И.А., Ватутин Э.И., Титов В.С.* Заявл. 8. 7.2 15, опубл. 2 .12.2 15. Бюл. № 35.
24. Патент РФ на полезную модель № 193927. Устройство для умножения бинарных матриц / *Гвоздева С.Н., Ватутин Э.И., Пшеничных А.О., Титов В.С.* Заявл. 26. 6.2 19, опубл. 21.11.2019.
25. Патент РФ № 2744239. Устройство для возведения бинарной матрицы в квадрат / *Гвоздева С.Н., Ватутин Э.И., Титов В.С.* Заявл. 5. 7.2 2 , опубл. 4. 3.2 21.
26. А.с. СССР 1429127 МПК G 6F17/16. Устройство для матричных операций / *Якуш В.П., Седухин С.Г., Авгуль Л.Б., Ленев А.А.* Заявл. 4. 3.1987. Опубл. 7.1 .1988.
27. *Гвоздева С.Н., Ватутин Э.И., Титов В.С.* Оценка быстродействия устройства с систолической структурой для умножения бинарных матриц // Телекоммуникации. – 2020. – Т. 3. – С. 2-10.
28. *Ватутин Э.И., Мартынов И.А., Титов В.С.* Оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2013. – № 4. – С. 11-20.
29. *Ватутин Э.И., Титов В.С.* Оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации с использованием расширения SSE (часть 1) // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2015. – Т. 1, № 4 (61). – С. 26-35.
30. *Ватутин Э.И., Титов В.С.* Оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации с использованием расширения SSE (часть 2) // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2015. – Т. 1, № 5 (62). – С. 8-16.

REFERENCES

1. *Shteynberg B.Ya.* Blochno-rekursivnoe parallel'noe peremnozhenie matrits [Block-recursive parallel matrix multiplication], *Izvestiya VUZov. Priborostroenie* [Proceedings of Higher Education Institutions. Instrumentation], 2009, Vol. 52, No. 10, pp. 33-41.
2. *Kozhin A.S, Nedbaylo Yu.A.* Metody optimizatsii vremeni dostupa v obshchiy kesh mnogoyadernogo mikroprotsessora [Methods for optimizing access time to the shared cache of a multicore microprocessor], *Voprosy radioelektroniki* [Questions of radio electronics], 2017, No. 3, pp. 27-32.
3. *Egunov V.A.* O vliyanii kesh-pamyati na effektivnost' programmnoy realizatsii bazovykh operatsiy lineynoy algebry [On the effect of cache memory on the effectiveness of software implementation of basic linear algebra operations], *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2018, No. 3, pp. 88-96.
4. *Bolgak A.V., Vatutin E.I.* Otsenka real'noy proizvoditel'nosti protsessorov semeystva Intel Core razlichnykh pokoleniy v zadache umnozheniya veshchestvennykh matrits dlya odnopotochnoy programmnoy realizatsii [Evaluation of the real performance of Intel Core processors of various generations in the task of multiplying real matrices for single-threaded software implementation], *Oblachnye i raspredelennye vychislitel'nye sistemy v elektronnom upravlenii. ORVS – 2023: Sb. trudov 4-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (28 noyabrya – 1 dekabrya 2023 goda)* [Cloud and distributed computing systems in electronic control. ORVS – 2023: Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference (November 28 – December 1, 2023)], ed. by I.I. Kurochkin [et al.]; IPS RAS. Pereslavl-Zalessky. Kursk: Izd-vo ZAO «Universitetskaya kni a». – 2024, pp. 98-100.
5. *Starovoytov I.N., Revnyakov E.N., Polyakova E.N.* Parallel'nye vychisleniya na graficheskikh protsessorakh [Parallel computing on graphics processors], *Pervaya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya po problemam tsifrovizatsii: EDCRUNCH URAL – 2020: Mater. konferentsii (Ekaterinburg, 29–30 sentyabrya 2020 g.)* [The First International Scientific Conference on Digitalization: EDCRUNCH URAL – 2020: conference proceedings (Yekaterinburg, September 29-30, 2020)]; Ministry of Science and Higher Education. education of the Russian Federation. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2020, pp. 314-319.

6. *Tumakov D.N., Chikrin D.E., Egorchev A.A., Golousov S.V.* Tekhnologiya programmirovaniya CUDA: ucheb. posobie [CUDA programming technology: a textbook]. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy universitet, 2017, 112 p.
7. *Vatutin E.I., Martynov I.A., Titov V.S.* Otsenka real'noy proizvoditel'nosti sovremennykh videokart s podderzhkoy tekhnologii CUDA v zadache umnozheniya matrits [Evaluation of the actual performance of modern graphics cards with support for CUDA technology in the matrix multiplication problem], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* [Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, computer engineering, computer science. Medical instrumentation], 2014, No. 2, pp. 8-17.
8. *Boreskov A.V., Kharlamov A.A. Markovskiy N.D. i dr.* Parallel'nye vychisleniya na GPU. Arkhitektura i programmnaya model' CUDA [Parallel computing on the GPU. CUDA architecture and software model]. Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 2012, 336 p.
9. *Volker S.* Gaussian Elimination is not Optimal, *Numerische Mathematik*. Springer Science+Business Media, 1969, Vol. 13, Iss. 4, pp. 354-356.
10. *Don C., Shmuel W.* Matrix Multiplication via Arithmetic Progressions, *Journal of Symbolic Computation,* 1990, pp. 251-280.
11. *Yushin A.M.* Spravochnik. Optoelektronnye pribory i ikh zarubezhnye analogi [Handbook. Optoelectronic devices and their foreign analogues]. Moscow: Izd-v «Radi S ft»2 , Vol. 1, 512 p.
12. *Belov P.A., Bespalov V.G., Vasil'ev V.N., Kozlov S.A., Pavlov A.V., Simovskiy K.R., Shpolyanskiy Yu.A.* Opticheskie protsessory: dostizheniya i novye idei [Optical processors: achievements and new ideas], *V kn.: Problemy kogerentnoy i ne-lineynoy optiki* [Problems of Coherent and Nonlinear Optics]. Saint Petersburg, 2006, pp. 6-36.
13. *Plaksienko V.S., Plaksienko N.E., Plaksienko S.V.* Ustroystva priema i obrabotki signalov: ucheb. posobie dlya vuzov [Signal reception and processing devices: A textbook for universities]. Moscow: Uchebno-met dicheskiy izdate 'skiy tsentr «Uchebnaya iteratura», 2004, 376 p.
14. *Lobach V.T., Potipak M.V.* Osnovy proektirovaniya tsifrovykh ustroystv radioelektronnykh sistem: ucheb. posobie [Fundamentals of designing digital devices of radioelectronic systems: a textbook]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, 140 p.
15. *Syryamkin V.I.* Intellektual'nye sistemy 4-y promyshlennoy revolyutsii: Sb. materialov IV Mezhdunarodnogo foruma, g. Tomsk, 15-16 dekabrya 2021 g. [Intelligent systems of the 4th industrial revolution: collection of materials of the IV International Forum, Tomsk, December 15-16, 2021]. Tomsk: STT, 2022, 104 p.
16. *Odinets A.I., Naumenko A.P.* Tsifrovye ustroystva: ATSP i TSAP: ucheb. posobie [Digital devices: ADC and DAC: textbook]. Omsk: Izd-vo IRSID, 2006, 48 p.
17. *Gümüşkaya Haluk, Örencik Bülent.* A parallel pipelined computer architecture for digital signal processing, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences,* 1998, Vol. 6, No. 2, Article 4, pp. 107-130.
18. *Strogonov A.V.* Osnovy tsifrovoy obrabotki signalov [Fundamentals of digital signal processing]. Vo- r nezh: FGBOU VPO «V r nezhskiy sudarstvennyy tekhnicheskiy universitet», 2 14.
19. *Zykov A.A.* Osnovy teorii grafov [Fundamentals of graph theory]. Moscow: Nauka, 1986, 384 p.
20. *Vatutin E.I., Zotov I.V.* Postroenie matritsy otnosheniy v zadache optimal'nogo razbieniya parallel'nykh upravlyayushchikh algoritmov [Construction of a matrix of relations in the problem of optimal partitioning of parallel control algorithms], *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Kursk State Technical University], 2004, No. 2, pp. 85-89.
21. *Aleskerov F.T., Khabina E.L., Shvarts D.A., Egorova L.G.* Binarnye otnosheniya, grafy i kollektivnye resheniya. Primery i zadachi: ucheb. posobie dlya vuzov [Binary relations, graphs and collective solutions. Examples and tasks: a textbook for universities]. Moscow: Izd-vo Yurayt, 2021, 458 p.
22. *Bobonova E.N.* Metody matematicheskoy obrabotki dannykh: ucheb. posobie [Methods of mathematical data processing: textbook]. Moscow; Vologda: Infrainzheneriya, 2024, 116 p.
23. *Martynov I.A., Vatutin E.I., Titov V.S.* Patent RF na p eznuyu m de ' № 157948. Ustr ystv d ya umnozheniya matrits [Patent of the Russian Federation for utility model No. 157948. Device for matrix multiplication]. Claimed 08.07.2015, publ. 20.12.2015. Bul. No. 35.
24. *Gvozdeva S.N., Vatutin E.I., Pshenichnykh A.O., Titov V.S.* Patent RF na p eznuyu m de ' № 193927. Ustroystvo dlya umnozheniya binarnykh matrits [Patent of the Russian Federation for utility model No. 193927. Device for multiplying binary matrices]. Claimed 26.06.2019, publ. 21.11.2019.

25. *Gvozdeva S.N., Vatutin E.I., Titov V.S.*Patent RF № 2744239. Ustr ystv d ya v zvedeniya binarnoy matritsy v kvadrat [Patent of the Russian Federation No. 2744239. Device for squaring a binary matrix]. Claimed 07.05.2020, publ. 03.04.2021.
26. *Yakush V.P., Sedukhin S.G., Avgul' L.B., Lenev A.A.* A.s. SSSR 1429127 MPK G06F17/16. Ustroystvo dlya matrichnykh operatsiy [A.S. USSR 1429127 IPC G06F17/16. Device for matrix operations]. Claimed 03.04.1987. publ. 10.07.1988.
27. *Gvozdeva S.N., Vatutin E.I., Titov V.S.* Otsenka bystrodeystviya ustroystva s sistolicheskoy strukturoy dlya umnozheniya binarnykh matrits [Evaluation of the performance of a device with a systolic structure for multiplying binary matrices], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2020, Vol. 3, pp. 2-10.
28. *Vatutin E.I., Martynov I.A., Titov V.S.* Otsenka real'noy proizvoditel'nosti sovremennykh protsessorov v zadache umnozheniya matrits dlya odnopotochnoy programmnoy realizatsii [Evaluation of the real performance of modern processors in the task of matrix multiplication for single-threaded software implementation], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* [Proceedings of the Southwest State University]. Series: Management, computer engineering, computer science. Medical instrumentation], 2013, No. 4, pp. 11-20.
29. *Vatutin E.I., Titov V.S.* Otsenka real'noy proizvoditel'nosti sovremennykh protsessorov v zadache umnozheniya matrits dlya odnopotochnoy programmnoy realizatsii s ispol'zovaniem ras-shireniya SSE (chast' 1) [Evaluation of the real performance of modern processors in the matrix multiplication problem for single-threaded software implementation using the SSE extension (part 1)], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Southwest State University], 2015, Vol. 1, No. 4 (61), pp. 26-35.
30. *Vatutin E.I., Titov V.S.* Otsenka real'noy proizvoditel'nosti sovremennykh protsessorov v zadache umnozheniya matrits dlya odnopotochnoy programmnoy realizatsii s ispol'zovaniem rasshireniya SSE (chast' 2) [Evaluation of the real performance of modern processors in the matrix multiplication problem for single-threaded software implementation using the SSE extension (part 2)], *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Southwest State University], 2015, Vol. 1, No. 5 (62), pp. 8-16.

Болгак Алексей Владимирович – Юго-Западный государственный университет; e-mail: aleksei.bolgack@yandex.ru; г. Курск, Россия; тел.: 79 81218651; аспирант кафедры вычислительной техники; ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6081-0395.

Ватутин Эдуард Игоревич – Юго-Западный государственный университет; e-mail: evatutin@rambler.ru; г. Курск, Россия; д.т.н.; доцент; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7362-7387.

Трокоз Дмитрий Анатольевич – Пензенский государственный университет; e-mail: dmitriy.trokoz@gmail.com; г. Пенза, Россия; д.т.н.; доцент; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0989-3928.

Bolgak Aleksei Vladimirovich – Southwest State University; e-mail: aleksei.bolgack@yandex.ru; Kursk, Russia; phone: +79081218651; post-graduate student of the Department of Computer Engineering; ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6081-0395.

Vatutin Eduard Igorevich – Southwest State University; e-mail: evatutin@rambler.ru; Kursk, Russia; dr. of eng. sc.; associate professor; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7362-7387.

Trokoz Dmitriy Anatol'evich – Penza State University; e-mail: dmitriy.trokoz@gmail.com; Penza, Russia; dr. of eng. sc.; associate professor; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0989-3928.

УДК 004.896 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-21-37

М.А. Ганжур, Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев

МНОГОСТАДИЙНЫЙ МУРАВЬИНЫЙ АЛГОРИТМ ОДНОМЕРНОЙ УПАКОВКИ НА БАЗЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ КОДИРОВАНИЯ РЕШЕНИЙ, И ДВУХУРОВНЕВОЙ ЭВОЛЮЦИОННОЙ ПАМЯТИ

Целью работы является разработка и исследование методов биоинспирированного поиска для решения задач одномерной упаковки в одинаковые контейнеры на базе эффективных алгоритмов кодирования и декодирования решений, композитного критерия и двухуровневой структуры эволюционной памяти. В работе предложена структура упорядоченного кода упаковки одномерных элементов в одинаковые контейнеры главное достоинство которого заключается в том, что одному решению упаковки соответствует один код и наоборот. Поисковая процедура базируется на модифицированной метаэвристике муравьиного алгоритма. На каждой итерации алгоритм одномерной упаковки имеет многостадийную структуру. Стадии выполняются последовательно одна за другой, начиная с первой. Каждая стадия C_k включает процедуры, выполняемые агентом z_k. Число стадий равно числу агентов в популяции плюс заключительная стадия итерации. Основная задача, решаемая конструктивным алгоритмом на стадии C_k, заключается в построении кода R_k упаковки множества элементов X в одинаковые контейнеры. Стадия делится на периоды по числу формируемых агентом z_k списков $X_{jк}$. Период делится на этапы. На каждом периоде последовательно по этапам решаются следующие задачи: агент z_k конструктивным алгоритмом формирует набор R_k упорядоченных списков $X_{jк}$ одномерной упаковки в одинаковые контейнеры; рассчитываются оценки f_{jk} упаковки каждого контейнера O_j элементами списка $<X_{jк}>$; рассчитывается количество λ_{jk} феромона, пропорциональное оценке f_{jk}; рассчитывается оценка $\Omega_k=\sum_i(f_{jk})$ одномерной упаковки множества элементов X в H одинаковых контейнеров; производится отложение феромона на ребрах графа G, соответствующих списку $X_{jк}$ в ячейки накопительной матрицы памяти E второго уровня. После формирования всеми агентами z_k популяции Z упорядоченных списков R_k, накопленный феромон добавляется в основную матрицу памяти Ф первого уровня. Для каждого R_k рассчитывается общий показатель F_k качества упаковки множества элементов X. Заключительная операция на итерации – испарение феромона на ребрах графа G и фиксация z_k с лучшим F_k. Проведены экспериментальные исследования заключающиеся в выяснении качества работы метода на тестовых наборах большой размерности. Для сравнения разработанного алгоритма с известными методами и с приближенными алгоритмами авторами было выбрано несколько групп бенчмарок из различных источников.

Одномерная упаковка; одинаковые контейнеры; методология; упорядоченный код решения; эволюционная память; двухуровневый композитный критерий; поисковая оптимизация; декомпозиция; роевой интеллект; муравьиная колония.

M.A. Ganzhur, B.K. Lebedev, O.B. Lebedev

MULTI-STAGE ANT ALGORITHM OF ONE-DIMENSIONAL PACKING BASED ON EFFICIENT DECISION ENCODING METHODS AND TWO-LEVEL EVOLUTIONARY MEMORY

The aim of the work is to develop and study bioinspired search methods for solving problems of one-dimensional packaging in identical containers based on effective algorithms for encoding and decoding solutions, composite criteria and a two-level structure of evolutionary memory. The paper proposes the structure of an ordered code for packing one-dimensional elements into identical containers, the main advantage of which is that one packaging solution corresponds to one code and vice versa. The search procedure is based on the modified metaheuristics of the ant algorithm. At each iteration, the one-dimensional packing algorithm has a multistep structure. The stages are performed sequentially one after the other, starting from the first one. Each stage of the C_k includes procedures performed by the z_k agent. The number of stages is equal to the number of agents in the population plus the final iteration stage. The main task solved by the constructive algorithm at the C_k stage is to construct the R_k code for packing a set of X elements into identical containers. The stage is divided into periods according to the number of lists X_{jk} generated by the agent z_k. The period is divided into stages. In each period, the following tasks are solved sequentially in stages: agent z_k constructively generates a set Rk of ordered lists Xjk of one-

dimensional packaging in identical containers; fjk estimates of the packaging of each container O_j by elements of the list $<X_{jk}>$ are calculated; the amount of λ_{jk} pheromone proportional to the f_{jk} estimate is calculated; the estimate $\Omega_k=\sum_i(f_{jk})$ is calculated one-dimensional packing of a set of elements X into H identical containers; pheromone is deposited on the edges of graph G corresponding to the list X_{jk} in the cells of the accumulative memory matrix E of the second level. After all agents of the z_k population Z have formed ordered lists of R_k, the accumulated pheromone is added to the main memory matrix Φ of the first level. For each R_k, the total F_k indicator of the packaging quality of the set of X elements is calculated. The final operation in the iteration is pheromone evaporation on the edges of graph G and fixation of z_k with the best F_k. Experimental studies have been conducted to determine the quality of the method's operation on large-dimensional test sets. To compare the developed algorithm with known methods and approximate algorithms, the authors selected several groups of benchmarks from various sources.

One-dimensional packaging; identical containers; methodology; ordered solution code; evolutionary memory; two-level composite criterion; search engine optimization; decomposition; swarm intelligence; ant colony.

Введение. Задача одномерной упаковки в одинаковые контейнеры является распространенной производственной задачей. Эта задача является членом большой семьи задач, многие из которых естественно возникают на практике и состоят в разбиении множества элементов на непересекающиеся подмножества [1]. Например, задачей одномерной упаковки является такая важная проблема исследования операций, как проблема машинного планирования, загрузки грузовиков с ограничением по весу. Она решается при производстве стали, стекла, бумаги, дизайне СБИС, составлении бюджета, форматировании таблиц, постраничном разбиении, а также при упаковке мусора в минимальное количество мусорных ведер и т.д. [2]. Рассматриваемая задача упаковки одномерных элементов в контейнеры является *NP*-полной [3]. Несмотря на высокую изученность задачи, существование огромного количества различных методов ее решения для ряда контрольных (тестовых) задач оптимальное решение не получено [4]. Более того, на данный момент не существует представленного в литературе универсального алгоритма, способного одинаково эффективно решать все тестовые задачи. В настоящее время весьма актуальными являются проблемы создания и разработки новых высокоточных и быстрых методов для синтеза проектных решений.

Возникшие потребности в решении задач большой и очень большой размерности является побудительным мотивом исследований и разработок новых эффективных алгоритмов. Ввиду вышеизложенного, задача упаковки блоков является актуальной проблемой комбинаторной оптимизации, стоящей перед специалистами в различных областях производства.

Анализ литературы показывает, что наиболее успешными в этих условиях являются математические методы, в которых заложены принципы природных механизмов принятия решений [5]. К таким методам можно отнести, прежде всего, методы адаптивного поведения [6], метод эволюционного моделирования [7], гибридные модели [8–1], алгоритмы роевого интеллекта [11, 12] и муравьиные алгоритмы (ACO) [13, 14].

На основе модернизированной метаэвристики муравьиного алгоритм была разработана иерархическая структура алгоритма. Одним из новых направлений непрекращающегося поиска наиболее эффективных методов упаковки стало использование с одной стороны бионических методов и алгоритмов, а с другой стороны использование эффективных методов кодирования решений и реконфигурируемой архитектуры, что позволило значительно уменьшить временную сложность алгоритма упаковки и увеличило на порядок размерность решаемых задач.

На основе модернизированной метаэвристики муравьиного алгоритм разработана иерархическая структура алгоритма одномерной упаковки в одинаковые контейнеры.

Постановка задачи одномерной упаковки в одинаковые контейнеры. Дано множество элементов $X=\{x_i|i=1,2,...,n_x\}$. Вес элементов задается множеством $W=\{w_i|i=1,2,...,n\}$. Необходимо упаковать все элементы в контейнеры, т.е. множество X разбить на H непустых и непересекающихся подмножеств X_j. Для всех формируемых подмножеств $X=\cup X_j$, $X_j\neq\varnothing$, $(\forall i,j)[X_i \cap X_j=\varnothing]$.

Каждое подмножество элементов X_j помещается в контейнер Q_j. $Q=\{Q_j|j=1,2,...,H\}$ – множество контейнеров, в которые распределено множество элементов X.

Пусть имеется некоторое решение задачи одномерной упаковки.

Суммарный вес W_j подмножества элементов X_j, назначенных в контейнер Q_j.

$$W_j \sum w_i, \text{ для } \{i|x_i \in X_j\}. \quad (1)$$

Задается максимально допустимый суммарный вес D элементов, назначенных в каждый контейнер Q_j: $W_j \le D$. Обозначим как $\delta_j = D - W_j$ остаток (незаполненный объем) контейнера Q_j. Тогда $\Delta = \sum_j \delta_j$ – суммарный остаток объема (веса) множества контейнеров Q.

Цель оптимизации – минимизация числа контейнеров H.

Для увеличения однородности ландшафта целевой функции и уменьшения резких перепадов ее значений в процессе поиска в пространстве решений авторами предложен двухуровневый композитный критерий F, включающий два показателя: (H – число контейнеров), (Δ – суммарный остаток веса H контейнеров). Критерий оптимизации:

$$F = \alpha H + \beta \Delta, \quad (2)$$

где α и β – коэффициенты пропорциональности.

Цель оптимизации – минимизация F.

В отличие от большинства критериев многокритериальной оптимизации, показатели H и Δ композитного критерия F не находятся в состоянии конфликта. Напротив, улучшение значения одного из них способствует улучшению значения другого.

Рассмотрим стандартную процедуру упаковки [2].

Дан упорядоченный, некоторым образом, список $<X>$ элементов для упаковки.

Первый элемент x_1 списка $<X>$ включается в контейнер Q_1. Элементы $x_2, \ldots, x_n$ рассматриваются в порядке их индексов: рассматриваемый элемент упаковывается в текущий контейнер Q_j, если не происходит переполнения контейнера; в противном случае он упаковывается в новый контейнер Q_{j+1}, который становится текущим. Временная сложность алгоритма $O(n)$. Очевидно, что существует такая последовательность элементов в списке, при которой решение задачи упаковки будет оптимальным. Таким образом, решение задачи упаковки сводится к нахождению упорядоченного списка $<X>$, используемого стандартной процедурой упаковки.

В результате декодирования, с помощью рассмотренной выше процедуры, список X представляется в виде упорядоченной последовательности списков X_j. $<X> = <X_1, X_2, X_3, \ldots, X_H>$, где X_j множество элементов, упакованных в контейнер Q_j.

Декодирование производится путем последовательного просмотра кода решения (вектора X), в соответствии с вышеприведенной процедурой.

Отметим, что порядок, в котором расположены элементы, входящие в состав одного контейнера Q_j, а также порядок, в котором списки X_j расположены в векторе $<X>$ не изменяет сущности решения.

Недостаток этого подхода заключается в том, что перестановка пары вершин, входящих в один список X_j, и перестановка списков X_j в одном списке X приводит к увеличению пространства поиска и к повышенным затратам при поиске решения.

Пусть имеется некоторое решение задачи одномерной упаковки: список $<X> = <X_1, \ldots, X_H>$, $<X> = \cup X_j$, $X_j \neq \varnothing$, $|X_j| = n_j$, $(\forall i,j)[X_i \cap X_j = \varnothing]$. Элементы каждого списка X_j упакованы в одном контейнере Q_j. Поскольку порядок расположения сформированных подмножеств X_j в составе списка $<X>$, и порядок, в котором элементы каждого подмножества X_j, расположенные в контейнере Q_j, не имеют значения, то одному коду решения будет соответствовать число списков P, равное $(H!) \cdot \Pi_j(n_j!)$, где $(H!)$ – количество комбинаций взаимного расположения списков X_j в составе общего списка $<X>$.

$n_j!$ – количество комбинаций взаимного расположения n_j элементов списка X_j.

В связи с этим при поиске решения актуальна проблема синтеза и просмотра только одного списка, соответствующего одному конкретному решению (одному коду).

Структура упорядоченного кода. В работе предложена структура упорядоченного кода $<R> = <<X_1>, <X_2>, \ldots, <X_H>>$. $R = \cup X_j$, $X_j \neq \varnothing$, $|X_j| = n_j$, $(\forall i,j)[X_i \cap X_j = \varnothing]$ упаковки одномерных элементов в одинаковые контейнеры главное достоинство которого заключается в том, что одному решению упаковки соответствует один код и наоборот.

Упорядоченный список $<R>$ обладает следующими свойствами:

- Пусть A_j первый элемент списка $<X_j>$.
- Первый элемент A_1 списка $<R>$имеет максимальный вес среди всех элементов списка $<R>$.
- Списки $<X_j>$в составе общего списка R упорядочены таким образом, что первые элементы A_j всех списков $<X_j>$ упорядочены в составе списка R по убыванию веса.
- В каждом списке $<X_j>$ элементы x_i, начиная со второго, упорядочены по убыванию веса.
- Построение упорядоченного списка $<R>$, обладающего перечисленными выше свойствами, выполняется последовательно на базе опорного упорядоченного вектора X^* с динамически изменяемым составом.
- Элементы исходного опорного списка X для упаковки упорядочиваются по убыванию весов, т.е. $w_{i-1} > w_i$. X^* – упорядоченное множество X. Например: $X^*=<x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}>$.

$$W=<8, 7, 6, 6, 5, 4, 4, 3, 3, 3, 2, 1>.$$

- Формирование упорядоченного списка элементов $<R>$ производится по очереди путем последовательного формирования списков $<X_j>$.
- Очередной, начиная с первого, список $<X_j>$ элементов формируется путем последовательного заполнения контейнера Q_j до упора.
- Формирование каждого списка $<X_j>$ включает две стадии.

Назовем разницу между предельным весом контейнера и суммарным весом упакованных в контейнере элементов остатком δ_j. Обозначим, как X^*_T и R_T текущие в процессе поиска состояния (состав) векторов X^* и $<R>$. Начальные текущие состояния $X^*_T=<x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}>$. $R_T = \varnothing$.

На первом шаге S_1 этапа формирования очередного списка $<X_j>$ выбирается первый $A1$, от начала, ненулевой элемент x^* опорного вектора X^*_T. $A1=x^*$. Определяется вес w^* элемента x^*. Элемент x^* размещается в первой позиции списка $<X_j>$и исключается из списка X^*_T. Рассчитывается вес остатка $\delta_j=D-w^*$ объема контейнера Q_j.

На втором шаге этапа формирования $<X_j>$ формируется список X_O элементов x_i таких, что каждый из них может быть добавлен в контейнер Q_j (в состав списка $<X_j>$) без его переполнения, т.е. $w_i \le \delta_j$. Далее на каждом из последующих шагов, начиная с первого, случайным образом, выбирается элемент $x_i \in X_O$, который включается в список $<X_j>$ и список R_T, а затем исключается из списка X^*_T. Рассчитывается остаток $\delta_j=O_j-w^*$ контейнера Q_j, формируется новый список X_O.

Если $X_O \neq \varnothing$, то повторяются действия, связанные с выбором элемента $x_i \in X_O$, для включения его в список X_j и список R_T.

Если $X_{O=}\varnothing$, то процесс заполнения контейнера Q_j (формирования списка X_j) завершается.

Ниже приведен пример формирования списков $<X_j>$ на базе описанных выше векторов X^*_T и W.

Список обозначений.

$X=<x_1, x_2, \ldots, x_n>$ – исходный список элементов.

X^* – упорядоченный по убыванию веса опорный список элементов множества X.

$<X_j>$ – упорядоченный код упаковки контейнера O_j.

$<R_k>$ – построенный агентом z_k упорядоченный код упаковки множества элементов X в одинаковые контейнеры, X^*_T и R_T текущие состояния векторов X^* и R.

$\Theta=\{R_k|i=1,2,\ldots,n_k\}$ – набор кодов, построенных популяцией агентов Z на итерации $Z=\{z_k|k=1,2,\ldots,n_z\}$ – популяция агентов.

k – номер агента.

l – номер итерации.

Пусть $X^*=<x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}>$.

$W=<8, 7, 6, 6, 5, 4, 4, 3, 3, 3, 2, 1>$.

$D=13$.

(j=1).
S_1. Выбор 1 элемента $A_1=x_1$ в X^*_T. w_1=8.
Расчет остатка $O_1=D - w_1$=13-8=5.
Формирование X_O=<$x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$>.
S_2. Случайный выбор элемента x_i в X_O: x_5.
w_5=5, $O_2 = O_1-w_5$ =5-5=0. δ_j =0.
Включение x_1, x_5 в R_T= <x_1, x_5 >.
Удаление x_1, x_5 из X^*_T. $j=j+1$.
X^*_T= <$x_2, x_3, x_4, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, _{12}$>.

(j=2).
S_1. Выбор 1 элемента $A_j=x_2$ в X_T. w_2=7.
Расчет остатка $O_1=D-w_2$=13-7=6.
Формирование X_O=<$x_3, x_4, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$>.
S_2. Случайный выбор элемента x_i в X_O: x_3.
w_3=6, $O_2 = O_1-w_3$ =6-6=0. δ_j =0
Включение x_2, x_3 в R_T=<x_1, x_5, x_2, x_3 >.
Удаление x_2, x_3 из X_T. $j=j+1$.
X^*_T = <$x_4, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$>.

(j=3).
S_1. Выбор 1 элемента $A_j= x_4$ в X^*_T. w_4=6.
Расчет остатка $O_1=D-w_4$=13-6=7.
X_O=<$x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$>.
S_2. Случайный выбор элементов x_i в X_O: x_8, x_6.
w_8=3, $O_2 = O_1-w_8$ =7-3=4.
w_6=4, $O_3 = O_2-w_6$= 4.4=0. δ_j =0.
$H=x_4, x_8, x_6$. Упорядоченный H=<x_4, x_6, x_8>.
Включение H в R_T=<$\underline{x_1}, x_5, \underline{x_2}, x_3, \underline{x_4}, x_6, x_8$>.
Удаление x_4, x_6, v_8 из X^*_T. $j=j+1$.
X^*_T= <$x_7, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$>.

(j=4).
S_1. Выбор 1 элемента $A1= x_7$ в X^*_T. w_7=4.
Расчет остатка $O_1=D - w_7$=13-4=9.
X_O=< $x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$>.
S_2. Случайный выбор элементов в X_O: $x_{10}, x_9, x_{12}, x_{11}$.
w_{10}=3, $O_2 = O_1-w_{10}$=9-3=6.
w_9=3, $O_3 = O_2-w_9$ =6-3=3. w_{12}=1, $O_4 = O_3$-1=3-1=2.
w_{12}=1, $O_4 = O_3$-1=3-1=2.
w_{11}=2, $O_5 = O_4-w_{11}$=2-2=0. δ_j =0.
$H= x_7, x_{10}, x_9, x_{12}, x_{11}$. Упорядоченный H= <$x_7, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$>.
Включение H в R_T.
R_T=<$\underline{x_1}, x_5, \underline{x_2}, x_3, \underline{x_4}, x_6, x_8, \underline{x_7}, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$>.
Удаление $x_7, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$ из X^*_T.
X^*_T= <>. $R=R(j)$. δ_j=0.
Если $X^*_T=\varnothing$, то конец формирования упорядоченного списка.
Сформированный код имеет вид:
R=< $\underline{x_1}, x_5, \underline{x_2}, x_3, \underline{x_4}, x_6, x_8, \underline{x_7}, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$ >.
W=<$\underline{8}$ 5 $\underline{7}$ 6 $\underline{6}$ 4 3 $\underline{4}$ 3 3 2 1>.
X_1=<$\underline{8}$ 5>, X_2=<$\underline{7}$, 6>, X_3=<$\underline{6}$, 4, 3>, X_4=<$\underline{4}$, 3, 3, 2, 1>. δ=0.

Решение задачи одномерной упаковки в одинаковые контейнеры методом муравьиной колонии. В качестве модели пространства поиска решений задачи одномерной упаковки в одинаковые контейнеры используется полный граф $G(X,U)$, где U – множество всех ребер полного графа, связывающих множество вершин x, соответствующих множеству элементов. $X=\{x_i|i=1,2,\ldots,n_x\}$. $U=\{u_{iv}|i=1,2,\ldots,n_x; v=1,2,\ldots,n_u; n_x=n_u\}$. u_{iv} – ребро графа G, связывающее вершины x_i и x_v. $(\forall_i \forall_v)[(x_i \in X)\&(x_v \in X)\&(u_{iv} \in U]$.

Задача одномерной упаковки сводится к задаче разбиения множества вершин X полного графа решений $G(X,U)$ на минимальное число H упорядоченных подмножеств $X_j \subset X$, с ограничениями на суммарный вес вершин каждого X_j. $W_j \leq D$. W_j, фактически является суммарным весом элементов, упакованных в контейнер.

Основной процедурой, при **формировании упорядоченного кода** R является процедура формирования упорядоченного списка X_j элементов, упаковываемых в одном контейнере O_j.

Каждый агент z_k популяции Z формирует упорядоченные списки X_{jk}, входящие в состав кода упаковки R_k, по очереди. Авторами предлагаются три подхода к решению поставленной задачи.

Первый подход предусматривает формирование, на базе списков W и X, общего упорядоченного кода $<R>$ упаковки путем последовательного формирования по очереди, начиная с первого, упорядоченных списков X_j, с минимизацией показателя $\delta_j = D - W_j$, $\delta_j \geq 0$, $X = \cup X_j$, $X_j \neq \varnothing$, $(\forall i,j)[X_i \cap X_j = \varnothing]$. δ_j – остаток (не заполненная часть контейнера O_j). $\delta_j \rightarrow min$. j – порядковый номер в очереди списков X_j.

Критерий оптимизации задачи упаковки – показатель H, находится во взаимной зависимости (корреляционной связи) с результатами формирования упорядоченных списков X_j, определяется как сформированное число H списков X_j.

Второй подход заключается в последовательном формировании упорядоченного кода общего решения с минимизацией показателя H – числа контейнеров.

Третий подход заключается в формировании упорядоченного кода общего решения с иерархической минимизацией H путем формирования последовательности упорядоченных списков X_j с минимизацией показателя δ_j. Процесс поиска решений муравьиным алгоритмом итерационный.

На каждой итерации алгоритм упаковки имеет многостадийную структуру. Стадии выполняются последовательно одна за другой, начиная с первой (рис. 1). Каждая стадия C_k включает процедуры, выполняемые агентом z_k. Число стадий равно числу агентов в популяции плюс заключительная стадия итерации. Основная задача, решаемая конструктивным алгоритмом на стадии C_k, заключается в построении кода R_k упаковки множества элементов X в одинаковые контейнеры. На каждой стадии C_k формируется набор $R_k = \{X_{jk} | j = 1,2,..n_j\}$ упорядоченных кодов списков $X_{j\kappa}$ вершин графа G. Стадия делится на периоды (рис. 2) по числу n_j формируемых агентом z_k списков $X_{j\kappa}$. Период делится на этапы (рис. 3).

$\{И_l\} \rightarrow \{C_1, C_2, \ldots, C_k, \ldots, C_{закл}\}$; $C_k \rightarrow \{П_{1k}, П_{2k}, \ldots П_{jk}, \ldots\}$; $П_{jk} \rightarrow \{Э_{1jk}, Э_{2jk}, Э_{3jk}\}$.

И – итерация; С – стадия; П – период; Э – этап.

На каждом периоде $П_{j\kappa}$ последовательно по этапам решаются следующие задачи: агент z_k конструктивным алгоритмом формирует набор R_k, $|R_k| = H$ упорядоченных списков $X_{j\kappa}$ одномерной упаковки в одинаковые контейнеры; рассчитываются оценки f_{jk} упаковки каждого контейнера O_j элементами списка $<X_{j\kappa}>$; рассчитывается количество λ_{jk} феромона, пропорциональное оценке f_{jk}; рассчитывается оценка $\Omega_k \sum_i (f_{jk})$ одномерной упаковки множества элементов X в H одинаковых контейнеров; производится отложение феромона на ребрах графа G, соответствующих списку $X_{j\kappa}$ в ячейки накопительной матрицы *памяти* $E = ||\varepsilon_{iv}||_{n \times n}$ второго уровня. После формирования всеми агентами z_k популяции Z упорядоченных списков R_k феромон, накопленный в $E = ||\varepsilon_{iv}||_{n \times n}$, добавляется в основную матрицу памяти $\Phi = ||\varphi_{iv}||_{n \times n}$ первого уровня.

Для каждого R_k рассчитывается общий показатель F_k качества упаковки множества элементов $X = \{x_i | i = 1,2,\ldots,n\}$.

Заключительная операция на итерации – испарение феромона на ребрах графа G и фиксация z_k с лучшим F_k.

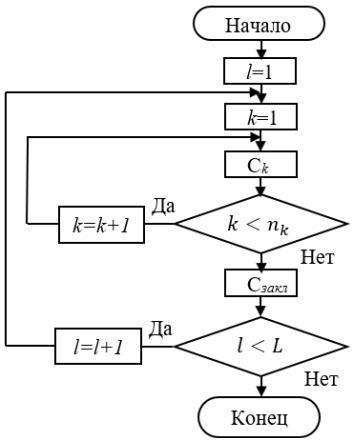


Рис. 1. Схема реализации блока процедур «Стадия»

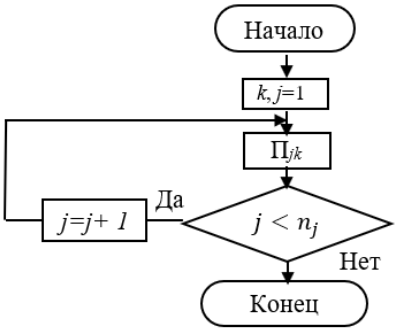


Рис. 2. Схема реализации блока «Период»

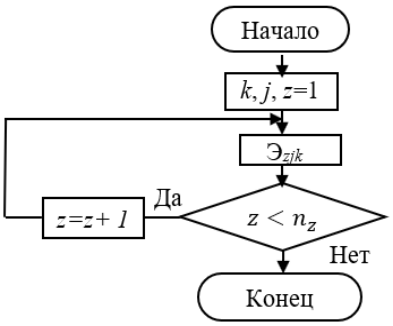


Рис. 3. Схема реализации блока «Этап»

Алгоритм одномерной упаковки на основе метода муравьиной колонии. Структурная схема алгоритма одномерной упаковки на основе метода муравьиной и представлена на рис. 4.

Фиксируются исходные данные.

$X=\{x_i|i=1,2,\ldots,n\}$ – исходный список элементов.

Параметры:

n_l – число итераций;

n_k – число агентов популяции;

D – предельный вес контейнера;

$W=\{w_i|i=1,2,\ldots,n\}$ – вес элементов.

Формируется начальное состояние базы данных муравьиного алгоритма.

В соответствии с методикой, вышеизложенной на примере, случайным образом формируется исходное множество $\Theta=\{R_k|k=1,2,\ldots,n_k\}$ упорядоченных кодов упаковки. Рассчитываются оценки решений, соответствующих сформированным кодам. Для каждого решения упаковки, соответствующего коду $R_к$, рассчитывается количество феромона, которое откладывается в ячейках основной матрицы памяти $\Phi=||\varphi_{iv}||_{n\times n}$.

Агенты обладают памятью.

Приводится в начальное состояние память агента z_k:

Элементам накопительной матрицы $E=||\varepsilon_{iv}||_{n\times n}$, присваивается нулевое значение.

$j=1$. $X^*_T=X^*$. $R_T=\varnothing$. $X_j=\varnothing$. X^*_T

В начале каждой итерации l формируется: опорный упорядоченный вектор $X^*=<x_i|i=1,2,\ldots,n|w_i\geq w_{i+1}>$. $k=1$. На каждой итерации l на стадии C_k агентом z_k последовательно решается задача формирования набора $R_k=\{X_{jk}|j=1,2,..n_j\}$ упорядоченных списков X_{jk} каждый из которых является кодом упаковки соответствующего контейнера O_j.

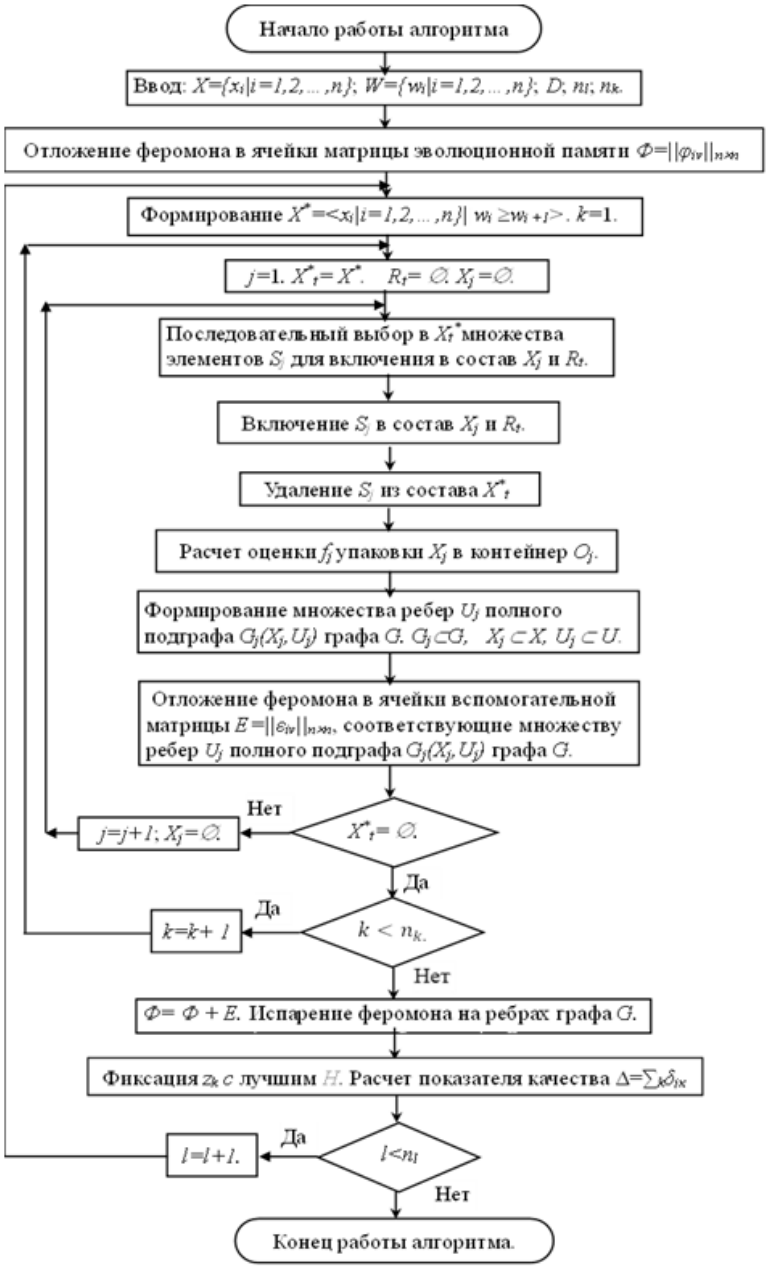


Рис. 4. Структурная схема алгоритма одномерной упаковки в одинаковые контейнеры

Задача формирования упорядоченного списка X_{jk}, являющегося кодом упаковки контейнера O_j, решается агентом z_k на каждом периоде $П_{jk}$, стадии $С_k$. Число списков равно числу периодов.

Необходимо упаковать элементы в минимальном количестве H_k контейнеров, т.е. множество X разбить на H_k непустых и непересекающихся подмножеств X_{jk} таких, что каждое подмножество элементов X_{jk} помещается в контейнер Q_j без переполнения.

Отметим, что число H_k контейнеров определяется только после того, как все элементы будут распределены по контейнерам.

Каждый список $<X_{jk}>$ формируется путем последовательной упаковки O_j.

Поиск решения задачи упаковки контейнера O_j (формирование списка X_{jk}) осуществляется агентом z_k на полном графе $G(X,U)$, где X – множество вершин, соответствующих множеству элементов. $|X|=n$, U –множество ребер графа G.

Моделирование поведения агентов в задаче упаковки контейнера связано с использованием эволюционной памяти, фиксируемой двумя матрицами памяти $\Phi=||\varphi_{iv}||_{n\times n}$ и $E=||\varepsilon_{iv}||_{n\times n}$.

Отражение коллективной эволюционной памяти в течение жизни популяции Z агентов осуществляется путем «откладывания» феромона на множестве ребер U графа G.

На начальном этапе во всех ячейках матрицы Φ откладывается одинаковое (небольшое) количество феромона Φ/v, где $v=|U|$. Параметр Φ задается априори.

Существующая каноническая парадигма муравьиного алгоритма предполагает построение маршрута в графе поиска решений G. В отличие от канонической парадигмы авторами предлагается концепция, заключающаяся в том, что целью агента z_k является формирование на графе поиска решений $G(X,U)$ набора R_k упорядоченных списков X_{jk}, отвечающих требованиям: элементы каждого списка упорядочены по убыванию веса w_i вершин множества X_{jk}; первый элемент множества X_{jk} имеет максимальное значение; суммарный вес W_{jk} множества вершин X_{jk} меньше D, $W_{jk} \le D$; а остаток $\delta_{jk}=(D-W_{jk})$ имеет минимальное значение. $W_{jk} \sum w_i$ для $\{i|x_i \in X_{jk}\}$, $X_{jk} \subset X$, $|X_{jk}|=n_{jk}$.

Формирование упорядоченных списков. На первом этапе $Э_{1jk}$ очередного периода $П_{jk}$ агент z_k конструктивным алгоритмом формирует упорядоченный список $<X_{jk}>$ вершин графа G. Каждый список $<X_{jk}>$ включает элементы, для упаковки в контейнере O_j.

Последовательное формирование упорядоченного списка $<X_{jk}>$ производится по шагам, путем включения на каждом шаге t элемента $x_i \in X_O(t)$ в Q_j.

Пусть X^*_T – множество вершин, соответствующих еще не упакованным элементам.

На первом шаге $t=1$, выбирается первый ненулевой элемент x_i в списке X^*_T, который включается в состав формируемых списков $<X_{jk}>$ и R_T и исключается из списка X^*_T.

На каждом последующем шаге, начиная с $t=2$ определяется множество $e_k(t)$ элементов x_i, включенных в состав $<X_{jk}(t)>$.

Определяется суммарная стоимость $W_{jk}(t)$ элементов множества $e_k(t)$.

Формируется множество вершин $X_O(t) \subset X^*_T$, соответствующих еще не упакованным элементам, таких, что если $x_i \in X_O(t)$, то элемент x_i может быть помещен в контейнер Q_j без переполнения, т.е. без превышения ограничения на вес. $(W_{jk}(t)+w_i) \le D$.

Если $X_0(t) \neq \varnothing$, то агент z_k просматривает в качестве кандидатов все вершины $x_i \in X_0(t)$.

Для каждой вершины $x_i \in X_0(t)$ определяется множество ребер $U_{ie} \subset U$, связывающих x_i с множеством элементов $e_k(t)$. Рассчитывается параметр $\xi_{ik}(t)$ – суммарный уровень феромона в ячейках матрицы памяти $\Phi=||\varphi_{iv}||_{n\times n}$, соответствующих ребрам $U_{ie} \subset U$ графа G, связывающих x_i с вершинами множества $e_k(t)$.

Вероятность P_{ijk} включения вершины $x_i \in X_0(t)$ в список $X_{jk}(t)$ определяется следующим соотношением:

$$P_{ijk}=\xi_{ik}(t) / \Sigma_i(\xi_{ik}(t)) \ (i|x_i \in X_0(t)). \quad (3)$$

Агент z_k с вероятностью P_{ijk} выбирает одну из вершин $x_i \in X_0(t)$, которая включается в список $<X_{jk}(t)>$. $<X_{jk}(t+1)>=<X_{jk}(t) \cup x_i>$. $t=(t+1)$.

Для сформированного списка $<X_{jk}>$ рассчитывается остаток δ_{jk} упаковки контейнера O_j и оценка f_{jk} упаковки O_j множеством элементов списка $<X_{jk}>$.

$$f_{jk}=\alpha \cdot \delta_{jk} / D, \quad (4)$$

где α – коэффициент пропорциональности.

Организация эволюционной памяти. Запоминание оценки решения соответствует процедуре отложения феромона на модели (ребрах графа) в количестве пропорциональном оценке решения. В работе используется циклический (ant-cycle) метод муравьиных систем. В этом случае феромон в полном объеме откладывается на ребрах графа G после полного формирования решений всеми агентами на каждой итерации [13]. Для хранения

интегральных оценок решений используется двухуровневая структура эволюционной памяти в виде двух матриц: *накопительная* $E=||\varepsilon_{iv}||_{n\times n}$, и *основная* матрицы памяти $\Phi=||\varphi_{iv}||_{n\times n}$.

На каждой итерации в процессе работы алгоритма агентами для последовательного накопления феромона за итерацию используется матрица $E=||\varepsilon_{iv}||_{n\times n}$, где ε_{iv} суммарное количество феромона, отложенного всеми агентами за одну итерацию на ребре u_{iv} графа G. В начале каждой итерации элементам накопительной матрицы $E=||\varepsilon_{iv}||_{n\times n}$, присваивается нулевое значение.

Для хранения феромона, накопленного всеми агентами на итерации в процессе работы алгоритма, используется матрица памяти $\Phi=||\varphi_{iv}||_{n\times n}$, где φ_{iv} количество феромона, отложенного агентами на ребре u_{iv} графа G. $(\forall_i \forall_v)[(x_i \in X)\&(x_v \in X)\&(u_{iv} \in U]$.

На втором этапе $Э_{2jk}$ периода $П_{jk}$ стадии C_k текущей итерации на множестве вершин $<X_{jk}(t)>$ графа G формируется полный подграф $G_{jk}=(X_{jk}, U_{jk})$, и определяется множество U_{jk} ребер $u_{iv} \in U_{jk}$ подграфа G_{jk}. $G_{jk} \subset G$, $<X_{jk}> \subset X$, $U_{jk} \subset U$. $u_{jv} \in U_{jk}$.

На третьем этапе $Э_{3jk}$ периода $П_{jk}$ рассчитывается количество λ_{jk} феромона, пропорциональное оценке f_{jk} упаковки списка $<X_{jk}>$.

$$\lambda_{jk}=\beta \cdot Qf_{jk}. \quad \lambda_{jk}=\beta \cdot \Phi / f_{jk}, \tag{5}$$

где β – коэффициент пропорциональности.

Φ – общее количество феромона, откладываемое агентом z_k на ребрах полного подграфа G_{jk}, f_{jk} – оценка списка $<X_{jk}>$, полученного агентом z_k на l-ой итерации. Чем меньше f_{jk}, тем больше феромона откладывается на ребрах U_{jk} подграфа G_{jk} и, следовательно, тем больше вероятность выбора этих ребер при формировании $<X_{jk}>$ на следующей итерации.

Феромон в количестве λ_{jk} откладывается в ячейках накопительной матрицы $E=||\varepsilon_{iv}||_{n\times n}$, соответствующих множеству U_{jk} ребер полного подграфа $G_{jk}=(X_{jk}, U_{jk})$ графа G.

$$(\forall u_{iv})[u_{iv} \in U_{jk})\&[\varepsilon_{iv}=\varepsilon_{iv}+\lambda_{jk}].$$

Каждый раз после формирования агентом z_k упорядоченного списка $<X_{jk}>$ производится расчет параметров δ_{jk}, f_{jk}, λ_{jk}, после чего на каждом ребре полного подграфа $G_{jk}=(X_{jk}, U_{jk})$ графа G «откладывается» феромон в количестве λ_{jk}.

В работе используются три методики учета результатов решения задачи упаковки.

При первом методе.

Агент на первом этапе после формирования каждого $<X_{jk}>$, каждый раз после формирования агентом z_k $<X_{jk}>$:

- рассчитываете оценка f_{jk} упаковки контейнера O_j элементами множества $<X_{jk}>$;
- рассчитывается количество $\lambda_{jk}=\beta \cdot Q/f_{jk}$ феромона, пропорциональное оценке f_{jk} упаковки списка $<X_{jk}>$;
- определяется множество U_{jk} ребер $u_{iv} \in U_{jk}$ полного подграфа $G_{jk}=(X_{jk}, U_{jk})$ графа G, $G_{jk} \subset G$, построенного на множестве вершин $<X_{jk}>$.
- феромон в количестве λ_{jk} откладывается в ячейках накопительной матрицы $E=||\varepsilon_{iv}||_{n\times n}$, соответствующих множеству U_{jk} ребер полного подграфа $G_{jk}=(X_{jk}, U_{jk})$ графа G.

$$(\forall u_{iv})[u_{iv} \in U_{jk})\&[\varepsilon_{iv}=\varepsilon_{iv}+\lambda_{jk}].$$

При втором методе после формирования на итерации l агентом z_k упорядоченного списка $R_k=\{X_{jk}|j=1,2,..,n_j\}$:

- фиксируется число $H=n_j$ упакованных контейнеров;
- формируется множество ребер $U_k=\cup U_j$;
- определяется количество феромона $\varphi_\kappa=\xi H$, которое откладывается на ребрах полных подграфов G_{jk}.

В работе предагаются три подхода учета результатов решения задачи упаковки.

При первом подходе феромон откладывается совместно по первой и второй методикам.

При втором подходе феромон откладывается только по первой методике.

При третьем подходе феромон откладывается только по второй методике.

После формирования на итерации l агентом z_k упорядоченного списка $R_k=\{X_{jk}|j=1,2,..n_j\}$ фиксируется число $H=n_j$ упакованных контейнеров определяется количество феромона $\varphi_к=\xi H$, которое дополнительно откладывается на ребрах полных подграфов G_{jk}.

Для хранения феромона, накопленного агентами на итерации в процессе работы алгоритма, используется матрица памяти $\Phi=||\varphi_{iv}||_{n\times n}$, где φ_{iv} количество феромона, отложенного агентами на ребре u_{iv} графа G. $(\forall_i \forall_v)[(x_i \in X)\&(x_v \in X)\&(u_{iv} \in U]$.

После формирования на итерации всеми агентами z_k популяции Z упорядоченных списков $\Theta=\{R_k|k=1,2,\ldots,n_k\}$ феромон, накопленный в $E=||\varepsilon_{iv}||_{n\times n}$, добавляется в основную матрицу памяти $\Phi=||\varphi_{iv}||_{n\times n}$. $\forall u_{iv}[\varphi_{iv}=\varphi_{iv}+\varepsilon_{iv}]$.

Для каждого R_k рассчитывается общий показатель качества $\Delta_k=\sum_j \delta_{jк}$ упаковки множества элементов $X=\{x_i|i=1,2,\ldots,n\}$ и фиксация z_k с лучшим H.

На заключительной стадии итерации осуществляется испарение феромона на ребрах графа G в соответствии с формулой:

$$\forall u_{iv}[\varphi_{iv}=\varphi_{iv}(1-\rho)], \tag{6}$$

где ρ – коэффициент обновления.

Далее осуществляется переход на следующую итерацию.

Заключительная операция на итерации – испарение феромона на ребрах графа G (в соответствующих ячейках памяти $\Phi=||\varphi_{iv}||_{n\times n}$). После выполнения всех действий на итерации находится агент с лучшим решением, которое запоминается.

Временная сложность этого алгоритма зависит от времени жизни колонии l (число итераций), количества вершин графа n и числа муравьев m, и определяется как $O(l\cdot n^2\cdot m)$.

Второй и третий подходы отличаются способами учета критериев оптимизации. При втором подходе, как и при первом минимизируется суммарный остаток $\Delta_k=\sum_j \delta_{jк}$ упаковки множества элементов $X=\{x_i|i=1,2,\ldots,n\}$ и минимизируется число контейнеров H. Производится двойное отложение феромона. Первое связано с отложением феромона на ребрах каждого подграфа $G_{jk,}$ построенного на множестве вершин $<X_{jk}>$ в количестве пропорциональном остатку $\delta_{jк}$. Второе связано с отложением феромона в количестве пропорциональном числу контейнеров H на ребрах полного подграфа G_k, построенного на множестве вершин $R_k=\{X_{jk}|j=1,2,..n_j\}$ – кода упаковки, построенного. агентом z_k.

Экспериментальные исследования. Для получения и исследования оптимальных и квазиоптимальных решений задачи одномерной упаковки был разработан программный комплекс. Основным способом исследования является запуск приложения на известных тестовых примерах – бенчмарках.

В окне, показанном на рис. 5, настраиваются параметры муравьиного алгоритма: число итераций, число муравьев, коэффициент испарения, начальный феромон и максимальный феромон. Степень завершения тестирования отображается Δ в окне, изображенном на рис. 6.

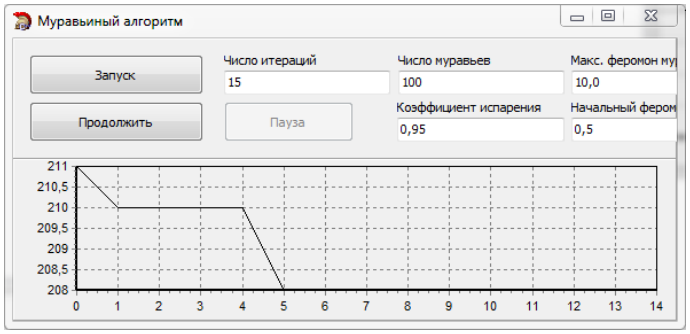


Рис. 5. Окно муравьиного алгоритма

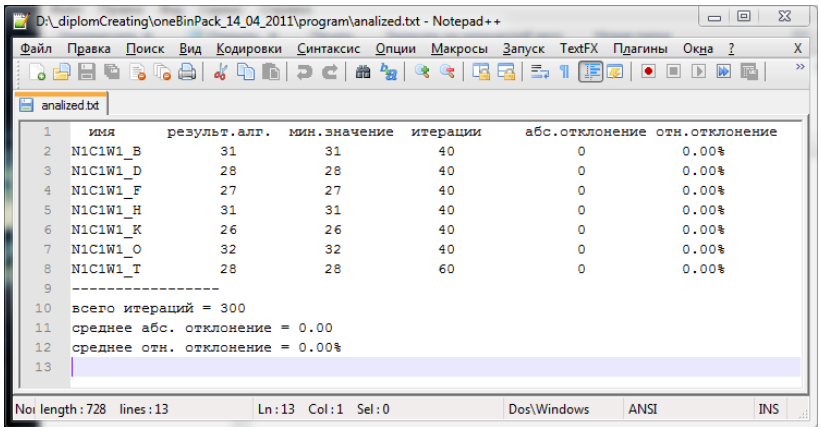


Рис. 6. Окно результатов тестирования

Временная сложность для алгоритма в целом составляет $O(m \cdot l \cdot n^2)$, где n – число вершин (элементов), m – число муравьев, l – время жизни колонии.

На рис. 7 представлена экспериментальная зависимость времени работы алгоритма от числа элементов n. По оси времени – время работы для 8 муравьев и 1 итераций.

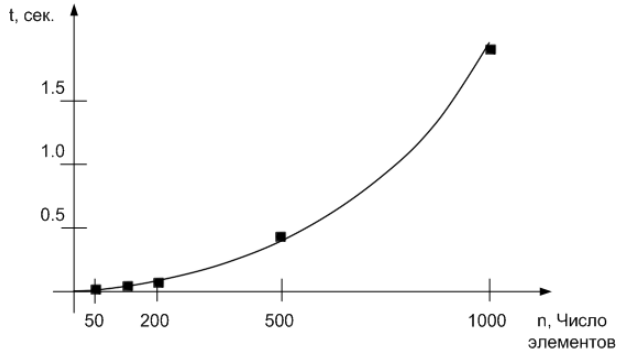


Рис. 7. Зависимость времени работы алгоритма от числа элементов

В качестве исследуемых параметров были выбраны следующие параметры муравьиного алгоритма: число муравьев m, коэффициент испарения k, отношение начального уровня феромона к максимальному феромону муравья γ. На рис. 8 представлены экспериментальные графики. Испытания проводились на группе равномерных бенчмарок, описанных в работе Э. Фалкенауэра [15].

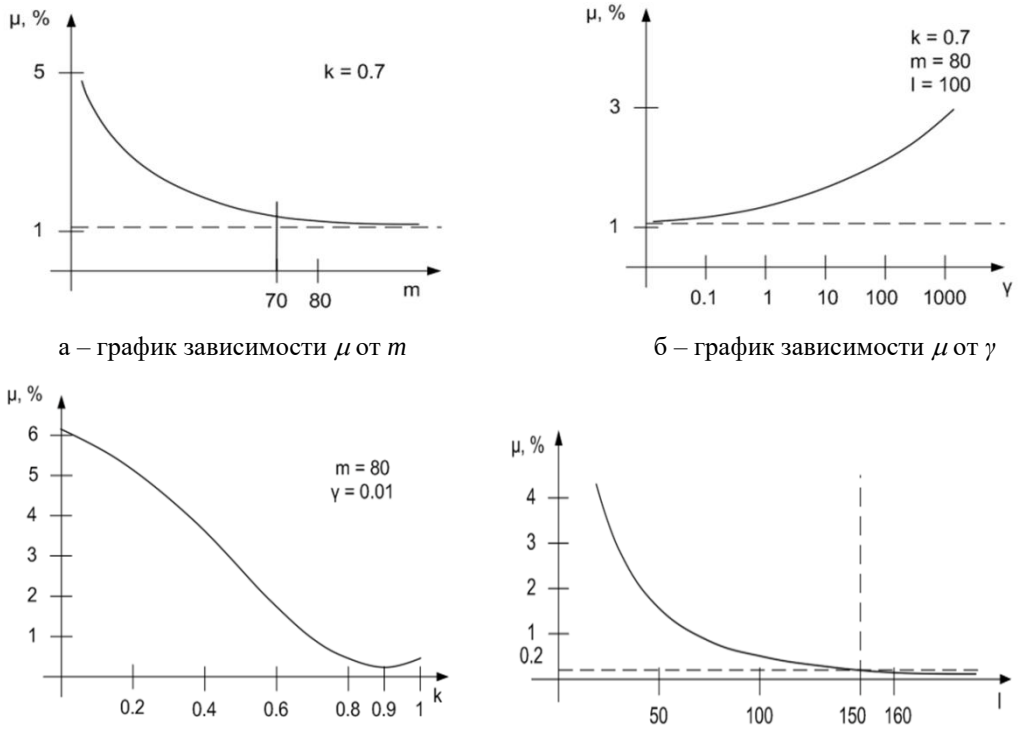
По оси ординат всех графиков (рис. 8) отложена величина μ – это среднее относительное отклонение от минимального значения качества решения.

$$\mu = \frac{1}{B}\sum_{i=0}^{B}\frac{x_i - x_{\text{мин}}}{x_{\text{мин}}} \cdot 100\%. \quad (7)$$

График на рис. 8,а построен при коэффициенте испарения k .7. Из него видно, что наименьшее количество муравьев, которое позволяет алгоритму находить качественное решение, находится в пределах 7 –80. γ – это отношение начального уровня феромона к максимальному значению феромона муравья.

Оптимальное значение коэффициента испарения равно .9, это видно на графике, изображенном на рис. 4,в. Этот график построен при m 8 и γ=0.01.

При найденных оптимальных параметрах был построен график сходимости, изображенный на рисунке 4г. Из него видно, что решение, отличающееся от минимального не более чем на ,2%, находится в среднем за 15 -16 итераций.



а – график зависимости μ от m

б – график зависимости μ от γ

в – график зависимости μ от k

г – график сходимости – зависимости μ от l

Рис. 8. Исследование параметров

Для сравнения разработанного алгоритма с другими известными методами авторами было выбрано несколько групп бенчмарок из различных источников: H1, H2, H3, U120, U250, U500, U1000, T60, T120, T249, T501 [15].

В табл. 1 АВР сравнивается с алгоритмом BISON [16]. Сравниваемые параметры:

- «Nмин.» – число бенчмарок в наборе, для которых найдено минимальное решение;
- «Δ(%)» – среднее отклонение результата от лучшего значения;
- $T_{ср}$ – среднее время, затраченное на одну бенчмарку.

Как видно, разработанный алгоритм эффективнее почти по всем параметрам, проигрывает только по времени выполнения набора данных H1.

Таблица 1

Сравнение с алгоритмом BISON

Тестовый набор	АВР			BISON		
	мин.	Δ(%)	$T_{ср}$	Nмин.	Δ (%)	$T_{ср}$
H1 (720)	709	1,57	43	597	2,38	32
H2 (480)	458	2,1	15	273	4,94	16
H3 (10)	4	4,68	15	1	5,85	18

В табл. 2 алгоритм АВР сравнивается с HGGA [15] и MTP [17]. В сравнении с MTP алгоритм АВР работает намного лучше как по времени, так и по качеству. Муравьиный алгоритм оказался быстрее генетического алгоритма HGGA, хотя немного уступает ему по качеству.

Таблица 2

Сравнение с алгоритмами HGGA и MTP

Тестовый набор	ABP		HGGA		MTP	
	Δ (%)	$T_{ср}$	Δ(%)	$T_{ср}$	Δ(%)	$T_{ср}$
U120 (20)	0,2	30	2,3	31	2,5	30
U250 (20)	2,2	37	2,5	33	2,9	29
U500 (20)	0,4	33	2,8	35	3,1	30,5
U1000 (20)	0,5	29	3.0	39	3,4	23
T60 (20)	1,1	36	3,2	37	4.0	31
T120 (20)	0,4	33	2.5	29	3,3	23
T249 (20)	0,7	31	2.4	28	3,0	28
T501 (20)	1,2	30	2.4	36	2,9	26

Проведено сравнение разработанного алгоритма с приближенными алгоритмами *FFD, BFD, WFD* для наборов данных H1, H2 и H3 [17].

Все три приближенных алгоритма уступают муравьиному по качеству, хотя позволяют получать решение за более короткий промежуток времени. При найденных оптимальных параметрах был построен график сходимости. Решение, отличающееся от минимального не более чем на ,2%, находится в среднем за 15 -16 итераций.

В результате экспериментов было установлено, что показатели качества ABP имеют более высокие значения чем в работах, представленных в литературе [18–20]. По сравнению с существующими алгоритмами достигнуто улучшение результатов на 3-5%.

Временная сложность алгоритма ABP, полученная экспериментальным путем, практически совпадает с теоретическими исследованиями и для рассмотренных тестовых задач составляет (BCA ≈ $O(n^2)$).

Заключение. Исходя из анализа решений, получаемых алгоритмами упаковки, построенными на различных метаэвристиках и эвристиках, было установлено, что большинство из них может быть улучшено. На основании этих выводов была разработана новая композитная поисковая архитектура алгоритма для решения задачи одномерной упаковки в одинаковые контейнеры.

В работе предложена структура упорядоченного кода <R> упаковки одномерных элементов в одинаковые контейнеры главное достоинство которого заключается в том, что одному решению упаковки соответствует один код и наоборот.

Разработан алгоритм построения агентом $z_{k.}$ упорядоченного кода упаковки множества элементов X в одинаковые контейнеры. Это позволило значительно уменьшить временную сложность алгоритма упаковки и увеличило на порядок размерность решаемых задач, что востребовано при решении распределительных задач. Для хранения интегральных оценок решений используется двухуровневая структура эволюционной памяти в виде двух матриц: *накопительная* $E=||\varepsilon_{iv}||_{n\times m}$, и *основная* матрицы памяти $\Phi=||\varphi_{iv}||_{n\times m}$.

Наличие двухуровневой структуры эволюционной памяти позволяет распараллеливать поиск решения. Агенты роя на каждой итерации параллельно формируют решения, опираясь на фиксированную основную память Накопленную информацию, отражающую оценки решений и степени приспособленности значений управляющих операторов, агенты вносят в основную память после выполнения итерации.

На основе модернизированной метаэвристики муравьиного алгоритма разработана иерархическая реконфигурируемая структура алгоритма одномерной упаковки в одинаковые контейнеры. Процесс поиска решений муравьиным алгоритмом итерационный. На каждой итерации алгоритм упаковки имеет многостадийную структуру. Стадии выполняются последовательно одна за другой, начиная с первой. Каждая стадия C_k включает процедуры, выполняемые агентом z_k. Число стадий равно числу агентов в популяции плюс заключительная стадия итерации. Основная задача, решаемая конструктивным алгоритмом на стадии C_k, заключается в построении кода R_k упаковки множества элементов X в одинаковые контейнеры. На каждой стадии C_k формируется набор R_k упорядоченных

списков $X_{jк}$ вершин графа G. Стадия делится на периоды по числу n_j формируемых агентом z_k списков $X_{jк}$. Период делится на этапы. Такой подход позволяет производить реконфигурацию архитектуры алгоритма с учетом специфики решаемой задачи.

Для увеличения однородности ландшафта целевой функции и уменьшения резких перепадов ее значений в процессе поиска в пространстве решений авторами предложен двухуровневый композитный критерий F, включающий два показателя: (H-число контейнеров), (Δ-суммарный остаток веса контейнеров). Критерий оптимизации – $F=\alpha H+\beta\Delta$, где α и β – коэффициенты пропорциональности. Цель оптимизации – минимизация F. В отличие от большинства критериев многокритериальной оптимизации, показатели H и Δ композитного критерия F не находятся в состоянии конфликта. Напротив, улучшение значения одного из них способствует улучшению значения другого.

Для сравнения разработанного алгоритма с известными методами авторами использовались несколько групп бенчмарок. В сравнении с поисковыми алгоритмами BISON, HGGA и MTP алгоритм ACO работает лучше как по времени, так и по качеству.

Все три приближенных алгоритма *FFD, BFD, WFD* уступают муравьиному по качеству, хотя позволяют получать решение за короткий промежуток времени.

По сравнению с существующими алгоритмами достигнуто улучшение результатов на 3-5%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кормен Т.Л.* Алгоритмы. Построение и анализ. – М.: Вильямс, 2007. – 196 с.
2. *Bischoff E.E.* Cutting and packing // European Journal of Operational Research. – 1995. – P. 503-505.
3. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Ганжур М.А.* Одномерная упаковка модифицированным методом муравьиной колонии // Тр. конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS– IT'23». Научное издание. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2023. – Т. 1. – С. 153-161.
4. *Курейчик В.М., Потарусов Р.В.* Проблема одномерной упаковки элементов // Известия ТРТУ. – 2006. – № 8. – С. 88-93.
5. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 448 с.
6. *Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Поисковая адаптация: теория и практика. – М.: Физматлит, 2006. – 272 с.
7. *Бекетов С.М., Зубкова Д.А., Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Редько С.Г.* Современные методы оптимизации и особенности их применения // Russian Technological Journal. – 2025. – 13 (4). – P. 78-94. – https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-78-94. – EDN: CVZOXD.
8. *Gupta J.N., Ho J.C.* A New Heuristic Algorithm for the One-dimensional Bin-packing Problem // Production Planning & Control. – 2009. – Vol. 10. – P. 598-603.
9. *Levine J.M., Ducatelle F.C.* Ant Colony Optimization and Local Search for Bin Packing and Cutting Stock Problems // Centre for Intelligent Systems and their Applications. – Edinburgh: University of Edinburgh, 2003. – P. 50-64.
10. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Распределение ресурсов на основе гибридных моделей роевого интеллекта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, № 6. – С. 1063-1073.
11. *Engelbrecht A.P.* Fundamentals of Computational Swarm Intelligence. – Chichester: John Wiley & Sons, 2005. – 114 p.
12. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедева Е.О.* Роевой алгоритм планирования работы многопроцессорных вычислительных систем // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». – № 3. – 2017.
13. *Лебедев О.Б.* Модели адаптивного поведения муравьиной колонии в задачах проектирования. – Таганрог. Изд-во ЮФУ, 2013. – 199 с.
14. *Dorigo M.A., Stutzle T.M.* Ant colony optimization. – Cambridge: MIT Press, 2004. – 151 с.
15. *Falkenauer E.I.* A hybrid grouping genetic algorithm for bin packing // Journal of Heuristics. – 1996. – Vol. 2. – P. 5-30.
16. *Scholl A.D., Klein R.B., Jurgens C.F.* BISON: A fast hybrid procedure for exactly solving the one-dimensional bin packing problem // Computers and Operations Research. – 1997. – P. 627-645.
17. *Martello S.K., Toth P.M.* Bin-packing problem // Algorithms and Computer Implementations. – 2002. – P. 221-245.

18. *Raidl G.R.* A Unified View on Hybrid Metaheuristics // In: Lecture Notes in Computer Science. – Springer, Verlag, 2006. – P. 1-12.
19. *Cong J., Romesis M., Xie M.* Optimality, Scalability and Stability Study of Partitioning and Placement Algorithms // Proc. of the International Symposium on Physical Design. – Monterey, CA, 2004. – P. 88-94.
20. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Ганжур М.А.* Биоинспирированный алгоритм распределения блоков по контейнерам // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 14-30.

REFERENCES

1. *Kormen T.L.* Algoritmy. Postroenie i analiz [Algorithms. Construction and analysis]. Moscow: Vil'yams, 2007, 196 p.
2. *Bischoff E.E.* Cutting and packing, *European Journal of Operational Research*, 1995, pp. 503-505.
3. *Lebedev B.K., Lebedev O.B., Ganzhur M.A.* Odnomernaya upakovka modifitsirovannym metodom murav'inoy kolonii [One-dimensional packing by a modified ant colony method], *Tr. kongressa po intellektual'nym sistemam i informatsionnym tekhnologiyam «IS– IT'23»* [Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies «IS-IT'23»]. Scientific publication. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2023, Vol. 1, pp. 153-161.
4. *Kureychik V.M., Potarusov R.V.* Problema odnomernoy upakovki elementov [The problem of one-dimensional packing of elements], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 8, pp. 88-93.
5. *Karpenko A.P.* Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennye prirodoy: ucheb. posobie [Modern algorithms of search engine optimization. Algorithms inspired by nature: a tutorial]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2021, 448 p.
6. *Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Poiskovaya adaptatsiya: teoriya i praktika [Search adaptation: theory and practice]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 272 p.
7. *Beketov S.M., Zubkova D.A., Gintsyak A.M., Burlutskaya Zh.V., Red'ko S.G.* Sovremennye metody optimizatsii i osobennosti ikh primeneniya [Modern optimization methods and their application features], *Russian Technological Journal*, 2025, 13 (4), pp. 78-94. Available at: https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-78-94. EDN: CVZOXD.
8. *Gupta J.N., Ho J.C.* A New Heuristic Algorithm for the One-dimensional Bin-packing Problem, *Production Planning & Control*, 2009, Vol. 10, pp. 598-603.
9. *Levine J.M., Ducatelle F.C.* Ant Colony Optimization and Local Search for Bin Packing and Cutting Stock Problems, *Centre for Intelligent Systems and their Applications*. Edinburgh: University of Edinburgh, 2003, pp. 50-64.
10. *Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Raspredelenie resursov na osnove gibridnykh modeley roevogo intellekta [Resource allocation based on hybrid models of swarm intelligence], *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics], 2017, Vol. 17, No. 6, pp. 1063-1073.
11. *Engelbrecht A.P.* Fundamentals of Computational Swarm Intelligence. Chichester: John Wiley & Sons, 2005, 114 p.
12. *Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedeva E.O.* Roevoy algoritm planirovaniya raboty mnogoprotsessornykh vychislitel'nykh sistem [Swarm algorithm for scheduling the work of multiprocessor computing systems], *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Inzhenernyy vestnik Dona»* [Electronic scientific journal «Engineering Bulletin of the Don»], No. 3, 2017.
13. *Lebedev O.B.* Modeli adaptivnogo povedeniya murav'inoy kolonii v zadachakh proektirovaniya [Models of adaptive behavior of an ant colony in design problems]. Taganrog. Izd-vo YuFU, 2013, 199 p.
14. *Dorigo M.A., Stutzle T.M.* Ant colony optimization. Cambridge: MIT Press, 2004, 151 p.
15. *Falkenauer E.I.* A hybrid grouping genetic algorithm for bin packing, *Journal of Heuristics*, 1996, Vol. 2, pp. 5-30.
16. *Scholl A.D., Klein R.B., Jurgens C.F.* BISON: A fast hybrid procedure for exactly solving the one-dimensional bin packing problem, *Computers and Operations Research*, 1997, pp. 627-645.
17. *Martello S.K., Toth P.M.* Bin-packing problem, *Algorithms and Computer Implementations*, 2002, pp. 221-245.
18. *Raidl G.R.* A Unified View On Hybrid Metaheuristics, *In: Lecture Notes In Computer Science*. Springer, Verlag, 2006. – P. 1-12.
19. *Cong J., Romesis M., Xie M.* Optimality, Scalability and Stability Study of Partitioning and Placement Algorithms, *Proc. of the International Symposium on Physical Design*. Monterey, CA, 2004, pp. 88-94.
20. *Lebedev B.K., Lebedev O.B., Ganzhur M.A.* Bioinspirirovannyy algoritm raspredeleniya blokov po konteyneram [Bioinspired algorithm for distributing blocks among containers], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 4, pp. 14-30.

Ганжур Марина Александровна – Донской государственный технический университет; e-mail: mganzhur@yandex.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 89081819111; кафедра вычислительных систем и информационной безопасности; старший преподаватель.

Лебедев Борис Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89282897933; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; д.т.н.; профессор.

Лебедев Олег Борисович – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89085135512; кафедра информатики; д.т.н.; профессор.

Ganzhur Marina Aleksandrovna – Don State Technical University; e-mail: mganzhur@yandex.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone:+79081819111; the Department of Computing Systems and Information; security senior lecturer.

Lebedev Boris Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79282897933; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; dr. of eng. sc.; professor.

Lebedev Oleg Borisovich – MIREA – Russian University of Technology; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79085135512; the Department of Computer Science; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.004.42 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-37-46

И.Е. Моисеенко, С.П. Тарасов, И.И. Турулин

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И ОСОБЕННОСТЕЙ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ФИЛЬТРОВ ХОГЕНАУЭРА КАК РЕКУРСИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Рассматриваются вопросы устойчивости каскадных интегратор-гребенчатых (CIC – cascade integrator-comb) фильтров, используемых в цифровой обработке сигналов, в том числе для децимации и интерполяции. Проведен краткий обзор современных публикаций, касающихся архитектурной оптимизации CIC-фильтров. Основное внимание уделено повышению устойчивости фильтров к переполнению разрядной сетки, анализу их устойчивости и методу синтеза рекурсивных КИХ-фильтров (фильтров с конечной импульсной характеристикой). Для лучшего понимания природы устойчивости CIC-фильтров в работе приведены математические выкладки, иллюстрирующие особенности накопления постоянной составляющей при различных конфигурациях блоков. Предложено изменение структуры CIC-фильтра, заключающееся в перестановке блоков интегратора и гребенчатого фильтра. Доказано, что такое изменение предотвращает накопление постоянной составляющей сигнала в интеграторах и, следовательно, исключает переполнение разрядной сетки вследствие накопления постоянной составляющей в интеграторе. Этот подход базируется на свойстве линейных фильтров, согласно которому изменение порядка включения не влияет на передаточную функцию. амплитудно-частотную характеристику, но в случае цифровых реализаций позволяет существенно снизить вероятность переполнения. Возможности аппаратной и программной реализации таких структур рассматриваются с точки зрения минимизации потерь точности и увеличения надежности работы систем цифровой обработки сигналов. Предложено использование целых чисел или чисел с фиксированной точкой для устранения накопления ошибок квантования. Кроме того, была разработана программа на языке Python, реализующая CIC-фильтр с учетом устойчивости к постоянной составляющей во входном сигнале и точным выполнением операций. Полученные результаты сопоставлены с современными подходами, представленными в научных исследованиях последних лет. Предложенные решения могут быть полезны при разработке цифровых фильтров для систем с ограниченными вычислительными ресурсами и повышенными требованиями к стабильности.

CIC-фильтр; Хогенауэр; цифровая обработка сигналов; децимация; импульсная характеристика; амплитудно-частотная характеристика; фазочастотная характеристика; Python; устойчивость фильтров.

I.E. Moiseenko, S.P. Tarasov, I.I. Turulin

ANALYSIS OF STABILITY AND FEATURES OF PRACTICAL IMPLEMENTATION OF HOGENAUER FILTERS AS RECURSIVE DIGITAL FILTERS WITH FINITE IMPULSE RESPONSE

The article considers the issues of stability of cascade integrator-comb (CIC) filters used in digital signal processing, including decimation and interpolation. A brief review of modern publications on the architectural optimization of CIC filters is given. The main attention is paid to increasing the stability of filters to the overflow of the bit grid, analyzing their stability and the method of synthesis of recursive FIR filters (filters with a finite impulse response). For a better understanding of the nature of the stability of CIC filters, the paper presents mathematical calculations illustrating the features of the accumulation of the constant component for various block configurations. A change in the structure of the CIC filter is proposed, consisting in the permutation of the integrator and comb filter blocks. It is proved that such a change prevents the accumulation of the constant component of the signal in the integrators and, therefore, eliminates the overflow of the bit grid due to the accumulation of the constant component in the integrator. This approach is based on the property of linear filters, according to which changing the order of inclusion does not affect the transfer function. amplitude-frequency characteristic, but in the case of digital implementations it allows to significantly reduce the probability of overflow. The possibilities of hardware and software implementation of such structures are considered from the point of view of minimizing the loss of accuracy and increasing the reliability of digital signal processing systems. It is proposed to use integers or numbers with a fixed point to eliminate the accumulation of quantization errors. In addition, a program in Python was developed that implements a CIC filter taking into account the stability of the constant component in the input signal and the accurate execution of operations. The obtained results are compared with modern approaches presented in scientific research in recent years. The proposed solutions can be useful in developing digital filters for systems with limited computing resources and increased stability requirements.

CIC filter; Hogenauer; digital signal processing; decimation; impulse response; amplitude-frequency response; phase-frequency response; Python; filter stability.

Введение. CIC-фильтры (Cascaded Integrator–Comb фильтры) решают ряд важных задач в цифровой обработке сигналов, особенно связанных с изменением частоты дискретизации [1]. Рассмотрим основные проблемы, которые они помогают решать: децимация, минимизация вычислительной сложности, первичная фильтрация, простота аппаратной реализации.

CIC-фильтр – это комбинированная структура, состоящая из интегратора (БИХ-фильтр) и разностного КИХ-фильтра. Фильтр-интегратор – это элемент, который накапливает (интегрирует) входные значения сигнала [2].

Интегратор работает по рекуррентному принципу, где текущее значение выхода вычисляется как сумма предыдущего выхода и текущего входного значение [3]. Математически это можно записать как:

$$y[n] = y[n-1] + x[n], \quad (1)$$

где $x[n]$ – входной сигнал, $y[n]$ – выходной сигнал интегратора.

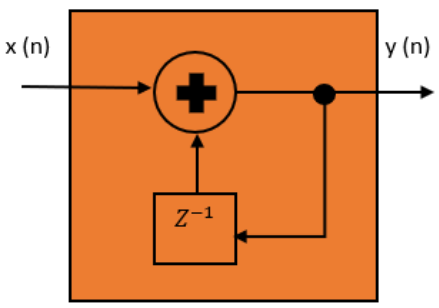


Рис. 1. Структурная схема интегратора

Гребенчатый (разностный) фильтр в составе CIC-фильтра обеспечивает формирование итоговой фильтрующей характеристики [4]. Гребенчатый фильтр реализует операцию вычитания из текущего значения входного сигнала его значение, полученное с некоторой задержкой [5]. Математически это можно записать как:

$$y[n] = x[n] + x[n - R], \quad (2)$$

где $x[n]$ – входной сигнал, R – параметр задержки, который часто совпадает с коэффициентом децимации [4].

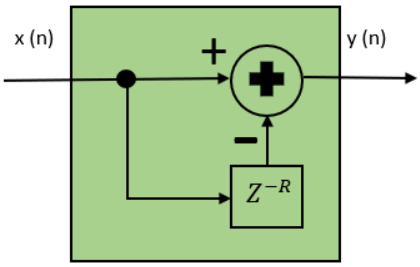


Рис. 2. Структурная схема гребенчатого фильтра

В CIC-фильтре несколько интеграторов последовательно аккумулируют входные данные, а затем соответствующее количество гребенчатых фильтров применяется для вычитания задержанных версий сигнала [6]. Такое чередование приводит к формированию общей низкочастотной характеристики с характеристическим sinc–подобным затуханием, что полезно для подавления высокочастотного шума и предотвращения алиасинга при децимации [7]. На рис. 3 изображена структурная схема простого CIC фильтра.

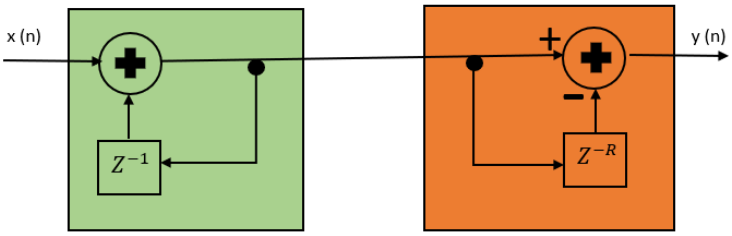


Рис. 3. CIC-фильтр первого порядка

При реализации CIC-фильтров важно учитывать разрядность вычислителя, поскольку от неё зависят точность, динамический диапазон и корректность работы фильтра [8].

В ряде современных работ также исследуются вопросы устойчивости и оптимизации CIC-фильтров. В частности, в [9] представлена оптимизация структуры CIC-фильтра для аппаратной реализации с учетом энергетических затрат. В [10] сравниваются подходы к усилению частотных характеристик FIR-фильтров с применением техник их уточнения (sharpening). Статья [11] уделяет внимание FPGA-реализации CIC-фильтров, а в [12] предложены способы адаптации фильтров к изменениям входного сигнала в реальном времени. Обзор современных подходов к квантованию и структурам КИХ-фильтров приведен в [13].

Улучшение устойчивости CIC-фильтра к переполнению. Для этого покажем, что гребенчатый фильтр C можно представить в виде каскадного соединения фильтра с прямоугольной КИХ:

$$\mathrm{hr[n]} = 1 \text{ при } \leq \mathrm{n} \leq \mathrm{R}-1, \text{ в остальных случаях } \mathrm{hr[n]} = 0, \quad (3)$$

и дискретного дифференциатора [4], выполняющего операцию:

$$\nabla\{h[n]\} = \nabla h[n] = h[n] - h[n - 1]. \quad (4)$$

Подав на вход дискретного дифференциатора единичный импульс ($\delta[n] = 1$ при $n = 0$ и $\delta[n] =$ при других n), и выполнив численное дифференцирование по формуле (4), получим КИХ дифференциатора

$$\nabla\{h[n]\} = \nabla h[n] = h[n] - h[n-1].h_{\nabla}[n] = 1, \quad (5)$$

если $n = 0$; $h_{\nabla}[n] = -1$,

если $n = 1$; $h_{\nabla}[n] = 0$ – в других случаях.

Выполнив численное дифференцирование формулы (3) по формуле (1), получим КИХ каскадного соединения КИХ (3) и дискретного дифференциатора

$$h_C[n] = 1 \text{ при } n = 0,$$

$$h_C[n] = -1 \text{ при } n = R,$$

$$h_C[n] = 0 \text{ – в других случаях.} \quad (6)$$

Как видно, формула (6) есть КИХ гребенчатого фильтра С, т.е. фильтр С содержит дискретный дифференциатор.

Если на вход фильтра (рис. 4) подать сигнал с постоянной составляющей, то первый (входной) интегратор будет ее накапливать, содержимое его сумматора будет расти, и в конце концов произойдет переполнение разрядной сетки [14]. На выходе первого гребенчатого фильтра С также будет постоянная составляющая, которая будет аналогично интегрироваться следующим интегратором с теми же последствиями в виде переполнение разрядной сетки.

Если поменять местами блоки I и С, т.е. блок С включить первым, то постоянная составляющая входного сигнала будет подавлена дискретным дифференциатором, входящим в блок С, и, при наличии во входном сигнале постоянной составляющей, переполнения не будет. Аналогично постоянной составляющей не будет на входе других интеграторов I в схеме на рис. 4.

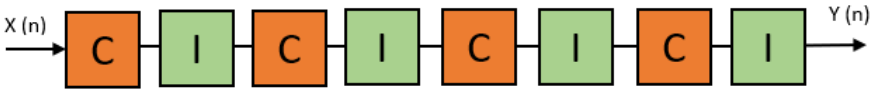


Рис. 4. Обеспечение устойчивости CIC-фильтра при округлениях результата вычислений

Заметим, что блоки в схеме на рис. 4 линейны, а, как известно, порядок каскадного включения линейных фильтров несущественен [4]. Однако в цифровых фильтрах присутствует источник нелинейности в виде ограниченной длины разрядной сетки, которая проявляется при ее превышении [15]. Если превышения не было, фильтр линеен. Поэтому с учетом практической реализации порядок включения линейных фильтров может быть существенен, как в данном случае.

В источнике [16] есть предположение, что подобная расстановка фильтров в системе может привести к ошибкам при округлении результатов вычислений и большом количестве отсчетов.

Для решения этой проблемы была предложена обратная расстановка гребенчатых фильтров и интеграторов.

Анализ устойчивости. Для анализа устойчивости выполним некоторые выкладки. Выполнив z-преобразование формулы (4), получим системную функцию дифференциатора:

$$H_{\nabla}(z) = 1 - z^{-1}. \quad (7)$$

Операция дискретного интегрирования производит суммирование всех предыдущих отсчетов входного сигнала $x[n]$, т. е. выходной сигнал интегратора:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{n} x[k]. \quad (8)$$

Линейное разностное уравнение интегратора I:

$$y[n] = x[n] + y[n-1]. \quad (9)$$

Выполнив z-преобразование формулы (8), получим его системную функцию:

$$H\Sigma(z) = 1/(1 - z^{-1}). \quad (10)$$

Сравнив формулы (7) и (10) можно убедиться, что операции дискретного дифференцирования и интегрирования взимообратны, т. е. $H_{\nabla}(z)\cdot H_{\Sigma}(z) = 1$.

Таким образом, фильтр с прямоугольной КИХ, представляющий собой каскадное соединение гребенчатого фильтра С и интегратора I, является рекурсивным по структуре и КИХ-фильтром по длине импульсной характеристики, с системной функцией

$$Hr(z) = (1 - z^{-R})/(1 - z^{-1}). \quad (11)$$

Если поделить числитель на знаменатель, получится функция

$$\sum_{k=0}^{R-1} z^{-k}, \quad (12)$$

соответствующая нерекурсивному фильтру с такой же прямоугольной КИХ.

Сам по себе интегратор является рекурсивным БИХ-фильтром, причем неустойчивым, поскольку его импульсная характеристика представляет собой единичную ступенчатую функцию, которые не затухает во времени, то есть фильтр не возвращается в исходное состояние после прекращения входного воздействия [17]. Если операции в фильтре выполняются точно, то преобразования формулы (11) в формулу (12) происходит точно. В противном случае в структуре как бы остается интегратор с малым коэффициентом передачи, порядка погрешности квантования (следствие неточного выполнения операций в фильтре), неустойчивость остаётся, хоть и сопровождается малой погрешностью, которая накапливается и циркулирует в интеграторе [18, 19].

Обычно даже в случае неточного выполнения операций такая погрешность проблем не вызывает, поскольку реальные системы чаще всего работают на ограниченных временных интервалах [20]. Однако для того, чтобы фильтр был строго устойчивым, необходимо точное выполнение операций в фильтре [21]. Это может быть достигнуто использованием целых чисел или чисел с фиксированной точкой.

В рекурсивных КИХ-фильтрах, описанных в [22, 23], обычно используется несколько каскадно включенных интеграторов, здесь необходимо точное выполнение операции в фильтре, поскольку постоянная погрешность на выходе первого интегратора интегрируется во втором, и на его выходе появляется линейно нарастающая функция, на выходе третьего интегратора – параболически нарастающая функция, и выходной сигнал такого фильтра быстро выходит за пределы разрядной сетки сумматора.

О методе синтеза рекурсивных КИХ-фильтров [22, 23]. Как видно из (3), КИХ фильтра Хогенауэра (3) задана в виде полинома нулевой степени аргумента *n*. В результате дискретного дифференцирования исходной прямоугольной КИХ по формуле (4) получим примитивный КИХ-фильтр – гребенчатый фильтр С с парой ненулевых коэффициентов (6), что резко снижает вычислительную сложность. Дискретный интегратор I, включенный каскадно с С (после него – для предотвращения накопления постоянной составляющей и переполнения) восстанавливает исходную КИХ.

Такой подход можно распространить на исходную КИХ любой степени p аргумента n [22, 23]. В этом случае КИХ дифференцируется по формуле (4) p + 1 раз, в результате чего получается примитивная КИХ с числом ненулевых коэффициентов не более с 2(p + 1). Рекурсивный КИХ-фильтр реализуется подключением к выходу примитивного фильтра p + 1 интеграторов, восстанавливающих исходную КИХ. Вычислительная сложность полученной структуры при большой длине исходной КИХ существенно ниже, чем у исходного нерекурсивного КИХ-фильтра. Интеграторы подключаются обязательно к выходу примитивного фильтра – для предотвращения накопления постоянной составляющей и переполнения каждого интегратора. Операции при фильтрации в рекурсивном КИХ-фильтре должны выполняться точно (это достигается использованием целых чисел или чисел с фиксированной точкой), иначе фильтр становится неустойчивым.

Реализация CIC-фильтра на Python с учетом устойчивости к постоянной составляющей во входном сигнале и точным выполнением операций. В программе реализованы фильтры Хогенауэра разной каскадности и производится их сложение для получения фильтра с заданными свойствами.

После запуска программа предлагает ввести входные данные для синтеза фильтра. Это параметр *N*, означающий количество стоящих друг за другом фильтров и их каскадность. Допустим, при $N = 3$ реализуется сложение однокаскадного, двухкаскадного и трехкаскадного фильтра. Параметр R – коэффициент децимации. В нашем случае, как было описано выше, он также является параметром задержки. Параметры весовых коэффициентов для каждого фильтра регулируют степень участия каждого фильтра в итоговой характеристике.

После инициализации необходимых переменных программа производит расчет фильтра интегратора и гребенчатого фильтра.

Фильтр-интегратор реализуется посредством операции свёртки с вектором, состоящим из единиц [24]. В начале функции «cic_filter_alternating» задаётся начальная импульсная характеристика фильтра: $h = np.ones(R)$.

Здесь $np.ones(R)$ создаёт массив длины R, заполненный единицами. Этот массив является импульсной характеристикой простейшего интегратора, который суммирует R последовательных входных значений (т.е. действует как скользящее суммирование или интегрирование за фиксированный промежуток).

В цикле $for\ i\ in\ range(N)$: происходит чередование интеграторов и гребенчатых (разностных) фильтров. Каждый раз, когда значение индекса «i» четное ($if\ i\ \%\ 2\ ==\ 0$), программа применяет очередной интегратор: $h = np.convolve(h, np.ones(R))$

Здесь происходит свёртка текущей импульсной характеристики h с вектором $np.ones(R)$. Это эквивалентно тому, что к уже накопленным данным применяется операция суммирования по блоку длины R. Такая операция реализует дискретное интегрирование, поскольку каждый новый выходной отсчёт является суммой предыдущего выходного отклика и группы входных значений [25].

Гребенчатый фильтр также реализуется в функции $cic_filter_alternating$. Создается массив длины $R + 1$, заполненный нулями.

$$h_comb = np.zeros(R + 1).$$

Затем устанавливаются два значения. Первый элемент $h_comb[0]$ задается равным 1, а последний элемент $h_comb[-1]$ задается равным –1. Это дает ядро $h_{comb} = [1,0,0,\dots,0,-1]$.

Такое ядро реализует операцию разности (2), то есть вычитает значение входного сигнала, отстающее на R отсчетов.

После создания ядра гребенчатого фильтра, оно применяется к текущей импульсной характеристике h посредством операции свертки: $h = np.convolve(h, h_comb)$.

Эта свертка осуществляет дифференцирование, устраняя накопленные эффекты, созданные предыдущими этапами интеграции, и формируя итоговую импульсную характеристику фильтра.

В переменной сохраняется список отдельных импульсных характеристик CIC фильтров, которые генерируются для каждого этапа (каскада) согласно введённым пользователем параметрам. Выражение:

$$filters = [np.nan_to_num(cic_filter_alternating(i + 1, R[i]))\ for\ i\ in\ range(N)]$$

в виде спискового включения (list comprehensi n) проходит по всем индексам от до $N - 1$ (где N – число фильтров, введенное пользователем). Для каждого «i»:

Вызывается функция $cic_filter_alternating(i + 1, R[i])$, где:

- $i + 1$ задаёт количество этапов (каскадов) для CIC фильтра на данном шаге. Таким образом, первый элемент соответствует CIC фильтру с одним этапом, второй – с двумя и так далее;
- $R[i]$ – коэффициент децимации, введённый пользователем для *i*–го фильтра.
- Функция возвращает массив (1D NumPy array), который является импульсной характеристикой этого CIC фильтра;
- Вызов $np.nan_to_num(\dots)$ используется для замены возможных NaN (если они возникли в результате вычислений) на числовые значения, чтобы гарантировать корректность полученного массива.

После выполнения этого выражения, переменная $filters$ становится списком, где:

- $filters[0]$ – импульсная характеристика CIC фильтра с 1 этапом (интегратор и гребенчатый фильтр) и коэффициентом децимации R[0];

- $filters[1]$ – импульсная характеристика CIC фильтра с 2 этапами и коэффициентом децимации R[1];
- И так далее до $filters[N-1]$.

Впоследствии эти отдельные импульсные характеристики комбинируются с заданными весовыми коэффициентами для формирования итогового фильтра. Каждый фильтр из списка $filters$ приводится к общей длине, затем умножается на соответствующий вес, и суммируется с другими, чтобы получить итоговую импульсную характеристику комбинированного фильтра. На рис. 5 приведена блок–схема моей программы.

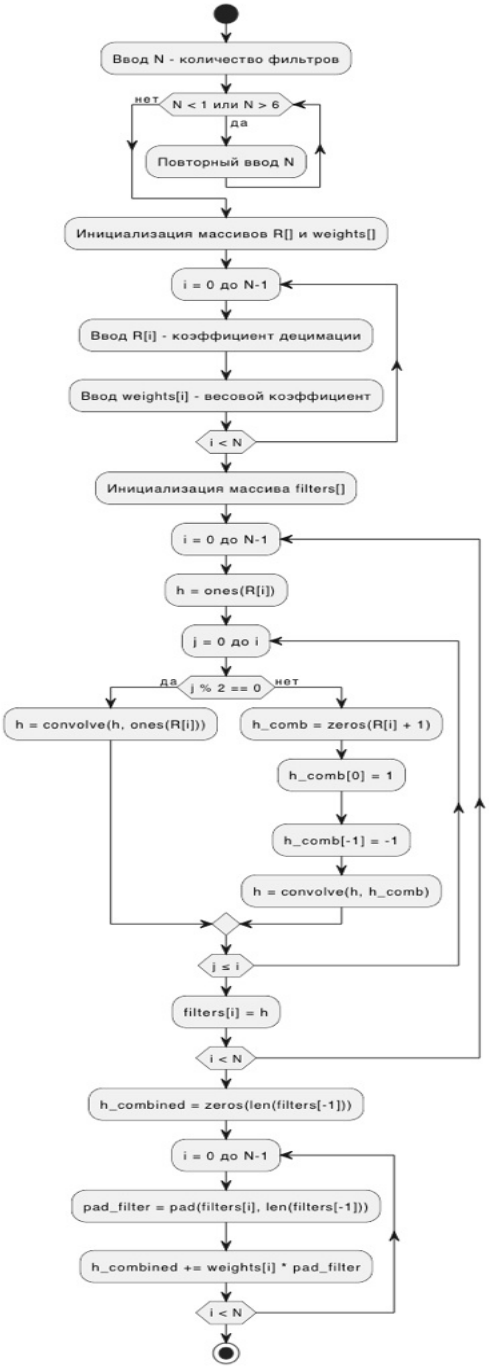


Рис. 5. Блок схема Python программы

Пример работы программы для $N = 3, R = 12$, весовые коэффициенты .3, .4, .3 соответственно на рис. 6–8:

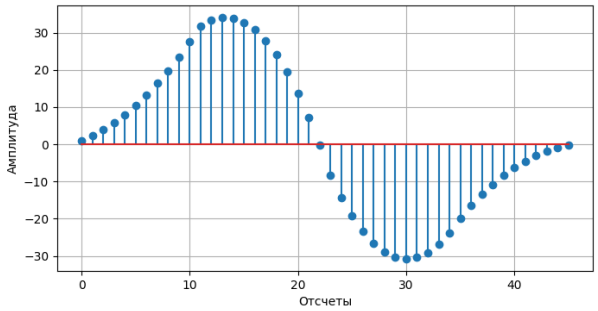


Рис. 6. Импульсная характеристика комбинированного CIC-фильтра

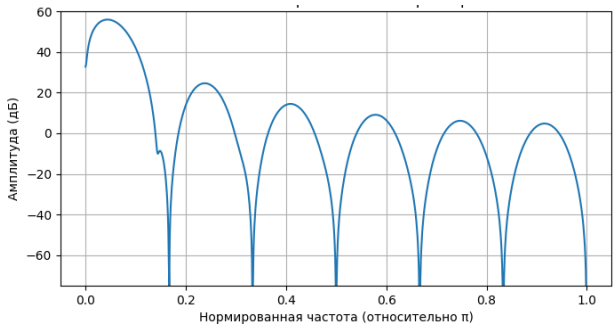


Рис. 7. АЧХ реализованного комбинированного CIC-фильтра

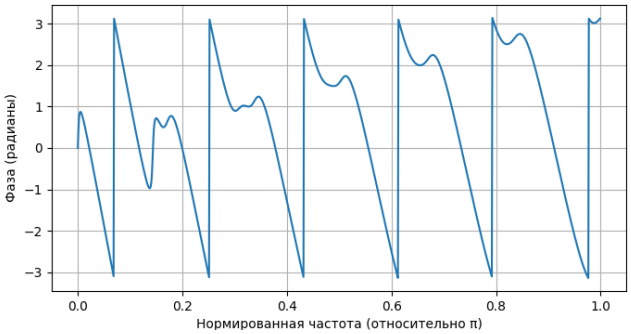


Рис. 8. ФЧХ реализованного комбинированного CIC-фильтра

Выводы. Проведенный анализ устойчивости показывает, для предотвращения накопления ошибок квантования операции в рекурсивных КИХ-фильтрах, в том числе фильтрах Хогенауэра, должны выполняться точно.

Применение метода синтеза рекурсивных КИХ-фильтров позволяет снизить вычислительную сложность фильтра, сохраняя его КИХ.

Перестановка блоков интегратора и гребенчатого фильтра позволяет исключить накопление постоянной составляющей и исключить ошибки переполнения.

Гибкость параметров и простота реализации подчеркивают практическую значимость CIC-фильтров в системах цифровой обработки сигналов, а анализ амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик подтверждает корректность их построения.

Разработанная программа демонстрирует успешную реализацию CIC-фильтра, учитывающую устойчивость к постоянной составляющей входного сигнала вследствие точного выполнения операций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hogenauer E.B.* An Economical Class of Digital Filters for Decimation and Interpolation // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 1981. – No. 29. – P. 155-162.
2. *Oppenheim A.V., Schafer R.W.* Discrete–Time Signal Processing. – Upper Saddle River, NJ: Prentice–Hall, 1989.
3. *Crochiere R.E., Rabiner L.R.* Multirate Digital Signal Processing. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice–Hall, 1983.
4. *Lyons R.G.* Understanding Digital Signal Processing. – Upper Saddle River, NJ: Prentice–Hall, 2004.
5. *Proakis J.G., Manolakis D.G.* Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications. – Upper Saddle River, NJ: Prentice–Hall, 1996.
6. *Vaidyanathan P.P.* Multirate Systems and Filter Banks. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice–Hall, 1993.
7. *Ziemer R.E., Tranter W.H., Fannin D.R.* Signals and Systems: Continuous and Discrete. – Upper Saddle River, NJ: Prentice–Hall, 1998.
8. *Mitra S.K.* Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach. – New York: McGraw–Hill, 2006.
9. *Wang J., Hu Y., Duan Y., Jin W.* Recursive Algorithm FIR Filter Quantization and Low-Cost Structure Optimization Design Based on MATLAB and Simulink // 2024 7th International Conference on Signal Processing and Information Communications (ICSPIC). – IEEE, 2024. – DOI: 10.1109/ICSPIC60374.2024.10387811.
10. *Ali I., Hasan M., Ahmed S.* Demonstration: Comparison of Three FIR Digital Filter Sharpening Techniques // 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – 2020. – DOI: 10.1109/ISCAS45731.2020.9180956.
11. *Liu C., Li J., Zhou Y.* Efficient Design of Sparse FIR Digital Filter // 2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – 2021. – DOI: 10.1109/ISCAS51556.2021.9362902.
12. *Zhou M., Li Y., Wang X.* Adaptive Digital Filter Design Based on CIC Structure // 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – 2020. – DOI: 10.1109/ICIEA48937.2020.9084880.
13. *Tang L., Wei J., Chen R.* Design of FIR Filter Based on FPGA // 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE). – 2020. – DOI: 10.1109/ICECE49637.2020.9163582.
14. *Antoniou A.* Digital Signal Processing: Signals, Systems, and Filters. – New York: McGraw–Hill, 2006.
15. *Smith S.W.* The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. – California: California Technical Publishing, 1997.
16. Hogenauer Digital Filters (CIC Filters). – URL: http://www.dsplib.ru/content/cic/cic.html (accessed: 06.02.2025).
17. *Пахомов А.И.* Дискретная фильтрация сигналов. – М.: Высшая школа, 1998.
18. *Oppenheim A.V.* The Evolution of Digital Signal Processing // Proceedings of the IEEE. – 2000. – No. 88. – P. 746-800.
19. *Rabiner L.R.* Digital Filters: An Introduction // IEEE Spectrum. – 1977. – No. 14. – P. 61-73.
20. *Берендеев П.В., Козлов С.А.* Цифровая обработка сигналов: теория и приложения. – М.: Наука, 2005. – С. 78-82.
21. *Harris F.J.* On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform // Proceedings of the IEEE. – 1978. – No. 66. – P. 51-83.
22. *Турулин И.И.* Метод проектирования рекурсивных фильтров общего вида с конечной импульсной характеристикой // Известия вузов. Электроника. – 2001. – № 6. – С. 97-98.
23. *Турулин И.И.* Основы теории рекурсивных КИХ-фильтров: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 264 с.
24. *Rabiner L.R., Gold B.* Theory and Application of Digital Signal Processing. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice–Hall, 1975.
25. *Соловьев В.Н.* Цифровые фильтры: теория и практика. – СПб.: Политехническое изд–во, 2 4. – С. 45-50.

REFERENCES

1. *Hogenauer E.B.* An Economical Class of Digital Filters for Decimation and Interpolation, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing,* 1981, No. 29, pp. 155-162.
2. *Oppenheim A.V., Schafer R.W.* Discrete–Time Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice–Hall, 1989.
3. *Crochiere R.E., Rabiner L.R.* Multirate Digital Signal Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice–Hall, 1983.
4. *Lyons R.G.* Understanding Digital Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice–Hall, 2004.

5. *Proakis J.G., Manolakis D.G.* Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications. Upper Saddle River, NJ: Prentice–Hall, 1996.
6. *Vaidyanathan P.P.* Multirate Systems and Filter Banks. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice–Hall, 1993.
7. *Ziemer R.E., Tranter W.H., Fannin D.R.* Signals and Systems: Continuous and Discrete. Upper Saddle River, NJ: Prentice–Hall, 1998.
8. *Mitra S.K.* Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach. New York: McGraw–Hill, 2006.
9. *Wang J., Hu Y., Duan Y., Jin W.* Recursive Algorithm FIR Filter Quantization and Low-Cost Structure Optimization Design Based on MATLAB and Simulink, *2024 7th International Conference on Signal Processing and Information Communications (ICSPIC)*. IEEE, 2024. DOI: 10.1109/ICSPIC60374.2024.10387811.
10. *Ali I., Hasan M., Ahmed S.* Demonstration: Comparison of Three FIR Digital Filter Sharpening Techniques, *2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS),* 2020. DOI: 10.1109/ISCAS45731.2020.9180956.
11. *Liu C., Li J., Zhou Y.* Efficient Design of Sparse FIR Digital Filter, *2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS),* 2021. DOI: 10.1109/ISCAS51556.2021.9362902.
12. *Zhou M., Li Y., Wang X.* Adaptive Digital Filter Design Based on CIC Structure, *2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA),* 2020. DOI: 10.1109/ICIEA48937.2020.9084880.
13. *Tang L., Wei J., Chen R.* Design of FIR Filter Based on FPGA, *2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE),* 2020. DOI: 10.1109/ICECE49637.2020.9163582.
14. *Antoniou A.* Digital Signal Processing: Signals, Systems, and Filters. New York: McGraw–Hill, 2006.
15. *Smith S.W.* The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California: California Technical Publishing, 1997.
16. Hogenauer Digital Filters (CIC Filters). Available at: http://www.dsplib.ru/content/cic/cic.html (accessed: 06 February 2025).
17. *Pakhomov A.I.* Diskretnaya fil'tratsiya signalov [Discrete Filtering of Signals]. Moscow: Vysshaya shkola, 1998.
18. *Oppenheim A.V.* The Evolution of Digital Signal Processing, *Proceedings of the IEEE,* 2000, No. 88, pp. 746-800.
19. *Rabiner L.R.* Digital Filters: An Introduction, *IEEE Spectrum,* 1977, No. 14, pp. 61-73.
20. *Berendeev P.V., Kozlov S.A.* Tsifrovaya obrabotka signalov: teoriya i prilozheniya [Digital signal processing: theory and applications]. Moscow: Nauka, 2005, pp. 78-82.
21. *Harris F.J.* On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform, *Proceedings of the IEEE,* 1978, No. 66, pp. 51-83.
22. *Turulin I.I.* Metod proektirovaniya rekursivnykh fil'trov obshchego vida s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy [A Method for Designing General-Purpose Recursive Filters with Finite Impulse Response], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Izvestiya Universiteta. Elektronika], 2001, No. 6, pp. 97-98.
23. *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.
24. *Rabiner L.R., Gold B.* Theory and Application of Digital Signal Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice–Hall, 1975.
25. *Solov'ev V.N.* Tsifrovye fil'try: teoriya i praktika [Digital Filters: Theory and Practice]. Saint Petersburg: Politekhnicheskoe izd–vo, 2004, pp. 45-50.

Моисеенко Иван Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: ivmoiseenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 796491 8479; аспирант.

Тарасов Сергей Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: tsp–47@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 79 34 79 4; д.т.н.; профессор.

Турулин Игорь Ильич – Южный федеральный университет; e-mail: iiturulin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 7961817 6 9; д.т.н.; профессор.

Moiseenko Ivan Evgenievich – Southern Federal University; e-mail: ivmoiseenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79649108479; postgraduate student.

Tarasov Sergey Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: tsp–47@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79034007904; dr. of eng. sc.; professor.

Turulin Igor Ilyich – Southern Federal University; e-mail: iiturulin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79618170609; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.3.062 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-47-57

С.И. Клевцов

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТОЧЕК ВРЕМЕННОГО РЯДА ПАРАМЕТРА

Оценка работоспособности технического объекта в режиме реального времени важна для устойчивого и безаварийного функционирования объекта в процессе его эксплуатации. Ранее была предложена модель классификации скорости изменения параметра на основе специализированной обработки облака точек участка временного ряда без извлечения тренда. Однако, некоторые предложения, например, связанные с невключением части точек ряда в процедуру построения модели, не были достаточно обоснованы и являются неочевидной попыткой избавиться от аномальных значений временного ряда. Некоторые этапы реализации модели, например, построение эллипса на преобразованном облаке точек, требуют детального представления, что важно для дальнейшего обучения модели и проведения классификации. В статье в рамках предварительной подготовки данных предложена процедура выявления и отсеивания аномальных значений временного ряда параметра, основанная на модификации метода Ирвина. Кроме того, представлена уточненная схема оценки значений критерия в модели классификации состояния параметра технического объекта. За критерий оценки взят коэффициент сжатия эллипса, который строится на облаке точек диаграммы рассеяния, вырезанных скользящим временным окном из временного ряда параметра. Для этого разработана итерационная процедура построения эллипса. Новая процедура обеспечивает более обоснованную и точную оценку критерия. Таким образом, построена модифицированная модель, которая позволит оценить в реальном времени появления нештатной ситуации на ранней стадии ее развития. Процедура оценки может быть реализована в составе программно-аппаратных средств системы мониторинга технического объекта.

Идентификация; оценка состояния; классификация параметров технического объекта; микроконтроллер.

S.I. Klevtsov

FEATURES OF THE FORMATION OF THE PROCESS OF CLASSIFYING THE CONDITION OF A TECHNICAL FACILITY BASED ON THE ANALYSIS OF POINTS IN THE TIME SERIES OF THE PARAMETER

Assessment of the operability of a technical facility in real time is important for the stable and trouble-free operation of the facility during its operation. Previously, a classification model for the rate of parameter change was proposed based on specialized point cloud processing of a time series segment without trend extraction. However, some proposals, for example, related to the non-inclusion of some points of the series in the model construction procedure, were not sufficiently justified and are an unobvious attempt to get rid of abnormal values of the time series. Some stages of the model implementation, for example, building an ellipse on a transformed point cloud, require a detailed representation, which is important for further model training and classification. In the article, as part of the preliminary data preparation, a procedure is proposed for detecting and screening out abnormal values of the time series of a parameter based on a modification of the Irwin method. In addition, an updated scheme for evaluating the values of the criterion in the classification model for the condition of a technical facility parameter is presented. The ellipse compression ratio is used as the evaluation criterion, which is based on a cloud of scatter plot points cut out by a sliding time window from the time series of the parameter. An iterative ellipse construction procedure has been developed for this purpose. The new procedure provides a more informed and accurate assessment of the criterion. Thus, a modified model has been built that will allow real-time assessment of the occurrence of an emergency situation at an early stage of its development. The evaluation procedure can be implemented as part of the hardware and software of the monitoring system of a technical facility.

Identification; condition evaluation technical object; parameter microcontroller classification.

Введение. Вопросы, связанные с оценкой работоспособности технического объекта в режиме реального времени, являются одними из основных в процессе эксплуатации объекта. Системы мониторинга объекта отслеживают его состояние с помощью анализа поведения различных параметров. Особое внимание обращается на учет динамики изменения параметра, поскольку эта информация помогает прогнозировать работоспособность объекта и таким образом на ранних этапах деградации реализовать необходимые меры по предотвращению возможных нештатных ситуаций [1–5].

Подходы, используемые для оценки работоспособности, часто базируются на классификации текущего значения тренда значимого параметра [6–8]. Однако, при наличии существенного уровня шумовой составляющей простые алгоритмы выделения тренда, необходимые для режима реального времени, могут приводить к существенным погрешностям [9–13].

В связи с этим ранее была предложена модель классификации скорости изменения параметра на основе специализированной обработки облака точек участка временного ряда без извлечения тренда [14, 15]. Однако, некоторые предложения, например, связанные с невключением части точек ряда в процедуру построения модели, не были достаточно обоснованы и являются неочевидной попыткой избавиться от аномальных значений временного ряда. Некоторые этапы реализации модели, например, построение эллипса на преобразованном облаке точек, требуют детального представления, что важно для дальнейшего обучения модели и проведения классификации.

В целом, требуется модификация модели для повышения эффективности процесса оценки состояния технического объекта.

Постановка задачи. Модифицируемая модель позволяет оценить состояние технического объекта на основе поведения одного критического параметра, который влияет на остальные параметры объекта таким образом, что по его динамике можно судить о степени изменения других параметров [14, 15].

Значения критичного параметра $z(t)$ фиксируются в дискретные моменты времени с постоянным шагом *h*. Шаг дискретизации *h* можно установить небольшим, чтобы изменение параметра в течение нескольких последовательных шагов было бы незначительным. Тогда имеем массив $Z = \{z_i\}_{i=0}^{n}$ измеренных значений параметра $z_i = z(t_i)$ в точках $t_0, t_1, ..., t_n$; $t_i = t_{i-1} + h$.

В модели используется временное окно, которое вырезает при движении вдоль временной оси участок ряда с фиксированным количеством точек. Полученное подмножество точек используется для классификации скорости изменения параметра технического объекта [6].

В результате для временного окна T_k получим массив $Z_{T_k} = \{z_i\}_{i=k}^{k+K}$ значений параметра, где $z_i = z(t_i)$, $t_i = t_k, ..., t_{k+K}$; $t_i = t_{i-1} + h$; $\{t_i\}_{i=k}^{k+K} \in T_k$; $Z_{T_k} \in Z$; $K \ll n$; $T_k = \{t_k, t_{k+1}, ..., t_{k+K}\}, k = 1, 2, ..., n - K$.

Классификации строится на основе набора значений критичного параметра, определяемого временным окном. Параметр, используемый для оценки, может характеризоваться высоким уровнем шума. Поэтому для классификации используются данные временного ряда параметра без существенной предварительной обработки, за исключением процедуры исключения выбросов, которую необходимо определить. Также важно сформировать схему построения эллипса как основы для определения классов и критериев в модели.

Таким образом, требуется рассмотреть особенности реализация отдельных этапов предварительной обработки и консолидации данных для построения модифицированной модели классификации уровней скорости изменения параметра технического объекта, базирующейся на версии модели, представленной в [15].

Процедура обнаружения и исключения аномальных значений участка временного ряда. Для определения скорости изменения критичного параметра предлагается рассматривать его временной ряд с предварительным отсеиванием точек, которые являются выбросами, то есть такими значениями, которые резко отличаются по величине от рядом расположенных точек.

Исходный ряд – нестационарный, содержащий наличие отдельных выбросов, аномальных значений, которые необходимо исключить до проведения процедуры классификации. Выбросы существенным образом могут повлиять на процедуру оценки. Они способны привести к значительному изменению критериев R_z, так как влияют на конфигурацию эллипса, формируемого на основе облака точек временного ряда, вырезанного скользящим временным окном.

Для построения эллипса важна реальная конфигурация точек на временной оси ряда, поэтому методы, обычно используемые для устранения выбросов во временных рядах и которые базируются на алгоритмах сглаживания [16], в данном случае не применимы.

Необходимо точечное определение точки, которую считаем выбросом, и замена значения выброса на величину, которая бы не оказывала серьезного влияния на конфигурацию эллипса. В этом случае методы, базирующиеся на использовании прогнозной модели временного ряда при определении выбросов, также не подходят, поскольку возникают трудности с подбором такой модели. Если построить такую модель на точках скользящего временного окна, например, используя метод наименьших квадратов, то возникают проблемы выбора базового типа выражения для прогнозной модели. Но даже подобрав подходящую функцию, например, полином n-го порядка, можно получить недостаточно точную аппроксимацию на концах отрезка временного ряда, что недопустимо для отсеивания выбросов.

В связи с этим для определения выбросов будем использовать метод Ирвина [17, 18], адаптированный к особенностям данной задачи.

Поскольку в реальном временном ряде точки, которые необходимо определить как выбросы, могут располагаться одна за другой, группой не более m_v (например, в данной задаче, $m_v \sim 1 \div 3$), то классический вариант метода Ирвина не может быть использован.

Тогда можно предложить модифицированный метод Ирвина для отсеивания выбросов.

1. Имеется временной ряд параметра технического объекта $Z = \{z_i\}_{i=0}^{n}$. Выбираем участок *d* временного ряда, желательно, лежащий в его начале и свободный от выбросов. Обозначим массив точек, вырезанный участком *d* через $D = \{z_j\}, j = 1,...,n_d$. Участок должен выбираться достаточно небольшим, но много больше m_v. Также массив *D* может быть получен в результате проведения численного моделирования. Участок *d* одновременно будет выполнять функции скользящего временного окна. На участке *d* определение выбросов не проводится.

2. Для точек массива *D* определим среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_d}\left(z_j - \overline{z}\right)^2}{n_d - 1}}, \text{ где } \overline{z} = \frac{\sum_{j=1}^{n_d} z_j}{n_d}.$$

3. Сдвинем временное окно *d* на 1 точку временного ряда вперед. Преобразуем вырезанный d ряд точек *D* в вариационный ряд D_v, например, все значения ряда расположим в порядке возрастания. Тогда ряд D_v выглядит следующим образом:

$D_v = \{\tilde{z}_k\}, k = 1,...,n_d$. На этапе преобразования *D* в D_v формируется схема соответствия индексов *j* и *k* так, чтобы по индексу *k* элемента ряда D_v можно найти индекс *j* элемента ряда *D*, то есть $z_j = \tilde{z}_k$.

4. В D_v на предмет наличия выбросов рассматриваются первый (наименьший) и последний (наибольший) элементы. Вычисляем критерий Ирвина для максимального и минимального значений:

$$I_{\max} = \frac{\left|\tilde{z}_{n_d} - \tilde{z}_{n_d-1}\right|}{\sigma_d};\ I_{\min} = \frac{\left|\tilde{z}_1 - \tilde{z}_2\right|}{\sigma_d}.$$

5. Сравним расчетные значения $I_{\max}, I_{\min}$ с табличным значением критерия I_{tab}. I_{tab} зависит от объема выборки n_d и уровня значимости [8, 9]. Если $I_{\max} > I_{tab}$ или $I_{\min} > I_{tab}$, то значение $\tilde{z}_{n_d}$ или $\tilde{z}_1$ ряда D_v считаются аномальными значениями ряда. Из схемы соответствия индексов можно найти соответствующие индексы элементов ряда *D*.

6. Аномальное значение ряда заменяется значением по формуле параболической интерполяции:

$$z_{j+1} = 3z_j - 3z_{j-1} + z_{j-2}.$$

7. Если не достигнут конец ряда Z, то переход на пункт 2.

Таким образом получим обновленный ряд Z без аномальных значений.

Процедура формирования критериев для классификации степени изменения параметра на основе преобразования облака точек временного ряда. Для классификации используем специальное представление значений ряда z_i в виде диаграммы рассеяния, когда точка $M_i(x_i, y_i)$ в декартовой системе координат имеет координаты $x_i = z_i$ по оси абсцисс и $y_i = z_{i+1}$ по оси ординат [19, 20]. Таким образом, точка $M_i(x_i, y_i)$ характеризует изменение значения временного ряда за промежуток времени, равный *h*. Тогда массиву точек временного ряда $Z_{T_k} = \{z_i\}_{i=k}^{k+K}$ соответствует массив точек диаграммы рассеяния $M_{T_k} = \{M_i(x_i, y_i)\}_{i=k}^{k+K-1}$, где $x_i = z_i,\ y_i = z_{i+1}$.

Для классификации скорости изменения параметра определим кортеж [11]:

$$\left\langle s_k, Z_{T_k}, R_z, S_z, T_k \right\rangle, \quad (1)$$

где Z_{T_k} – массив значений параметра *z* во временном окне T_k (далее Z_k); R_z – вектор численных значений критерия оценки скорости изменения параметра z, соответствующий вектору классов S_z, определяющему качественную оценку параметра. Каждый элемент вектора S_z связан с одним из элементов вектора R_z; s_k – текущее значение класса для участка изменения параметра, зафиксированного временным окном T_k, $s_k \in S_z$.

В качестве численного критерия R_z предложено использовать коэффициент сжатия эллипса (эллиптичность) $k = b/a$, где *a* и *b* – большая и малая полуоси эллипса, поскольку облако точек диаграммы рассеяния для участка временного ряда технического параметра, как правило, имеет форму эллипса, а скорость изменения параметра можно представить на диаграмме рассеяния в виде сжатия или растяжения эллипса [11, 15].

В соответствии с (1) для оценки динамики изменения параметра предварительно необходимо определить элементы вектора классов S_z и критерий R_z. Поскольку вектор классов S_z определяет качественную оценку, то определение классов зависит от функционального назначения объекта и характеризует степень работоспособности объекта при том или ином уровне скорости изменения параметра, например, «работоспособен» и «не работоспособен» или «стабильное движение» и «нестабильное движение».

Значения критерия R_z, соответствующие классам S_z, определяются процедурой построения эллипса на облаке точек участка временного ряда.

Для определения направления большой оси эллипса, который можно сформировать на основе точек массива Z_{T_k}, вырезанных скользящим окном T_k из временного ряда *z(t)*, построим линейную функцию $y = d_1 \cdot x + d_0$. В качестве исходных данных рассматривался массив точек M_{T_k}. В качестве инструмента построения использовался метод наименьших квадратов.

Для определения второй оси эллипса требуется найти центр масс точек рассматриваемого участка ряда. Обозначим по оси абсцисс (ось *x*) и оси ординат (ось *y*) координаты центра масс точек из Z_{T_k} через G_{kx}, G_{ky}. Поскольку веса точек выделенного участка временного ряда в нашей задаче являются одинаковыми, их можно принять равными единице для всех точек.

Рассмотрим функционал $\Omega = \sum_{i=k}^{k+K-1} (\vec{r}_i - \vec{r}_G)^2$, где $\vec{r}_i$ – радиус-вектор точки $M_i(x_i, y_i)$ с координатами x_i и y_i, численно равными значениям временного ряда z_i и z_{i+1}; $\vec{r}_G$ – радиус-вектор центра масс точек диаграммы рассеяния для T_k временного окна.

Найдем координаты G_{kx}, G_{ky} из условия $\min_r \Omega$:

$$G_{kx} = \frac{\sum_{i=k}^{k+K-1} z_i}{K-1};\ G_{ky} = \frac{\sum_{i=k+1}^{k+K} z_i}{K-1} \tag{2}$$

Через точку центра масс $G_k\left(G_{kx}, G_{ky}\right)$ построим линию, перпендикулярную прямой $y = d_1 \cdot x + d_0$:

$$y = -\frac{1}{d_1} \cdot x + \left(G_{ky} + \frac{1}{d_1} \cdot G_{kx} \right).$$

Эта линия определяет направление малой оси эллипса.

На точках Z_{T_k} участка временного ряда *z(t)* построим эллипс так, чтобы включал в себя все точки, за исключением тех, которые были признаны на этапе предварительной обработки ряда аномальными значениями.

Перенесем центр координат в точку $G_k\left(G_{kx}, G_{ky}\right)$. Большая ось эллипса будет направлена вдоль прямой $y = d_1 \cdot x + d_0$ (ось абсцисс), а малая ось – вдоль перпендикулярной прямой (ось ординат).

На основе результатов, полученных в [11, 14, 15] облако точек параметра технического объекта, вырезанное скользящим временным окном, как правило, располагается в первом квадранте декартовой системы координат. Центр новой системы координат находится в точке $G_k\left(G_{kx}, G_{ky}\right)$, а угол поворота относительно старой системы координат $\varphi < \pi/2$.

Новая система координат $0'x'y'$ (рис. 1) построена с помощью параллельного переноса исходной системы координат $0xy$:

$$x = d_1 + x';\ y = d_0 + y' \tag{3}$$

и поворота на угол φ:

$$x = x' \cdot \cos\varphi - y' \sin\varphi;\ \ y = x' \sin\varphi + y' \cos\varphi, \tag{4}$$

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+d_1^2}}, \sin\varphi = a \cdot \sqrt{\frac{1}{1+d_1^2}}.$$

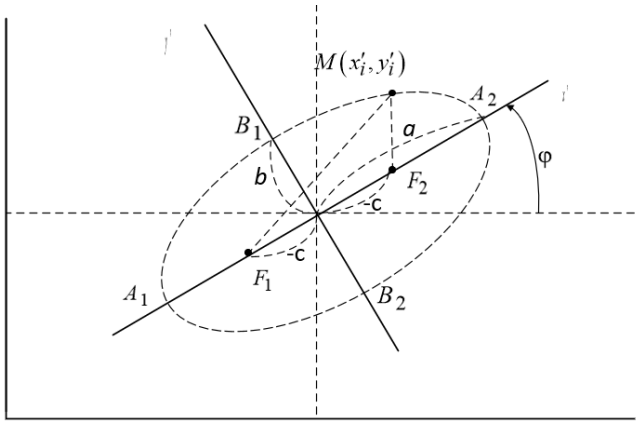


Рис. 1. Построение системы координат $0'x'y'$

На основе выражений (3) и (4) можно получить соотношения, связывающие координаты произвольной точки $M\left(x_i', y_i'\right)$ в системе координат $0'x'y'$ с координатами той же точки $M\left(x_i, y_i\right)$ в системе координат $0xy$:

$$x_i' = \left(x_i - d_1\right) \cdot \cos\varphi + \left(y_i - d_0\right) \cdot \sin\varphi, \quad (5)$$

$$y_i' = -\left(x_i - d_1\right) \cdot \sin\varphi + \left(y_i - d_0\right) \cdot \cos\varphi. \quad (6)$$

Соотношения (5) и (6) позволяют вычислить координаты точек, вырезанных временным окном, в новой системе координат, что необходимо для построения эллипса на облаке точек. В результате будем иметь множество $M_{T_k}' = \left\{M_i'(x_i', y_i')\right\}_{i=k}^{k+K-1}$ точек диаграммы рассеяния в новой системе координат $0'x'y'$

После процедуры удаления выбросов рассматриваются все точки, представленные на текущей диаграмме рассеяния. Выстроим множество точек $M_{T_k}' = \left\{M_i'(x_i', y_i')\right\}_{i=k}^{k+K-1}$ в ряд по возрастанию $|x'|$. Координата x_{k+K-1}' будет считаться первым приближением большой полуоси эллипса *a*. Аналогично можно определить координату y_{k+K-1}', которая будет первым приближением малой полуоси эллипса *b*. Таким образом, получены оценки полуосей эллипса *a* и *b*.

Часть точек из может лежать вне эллипса, построенного на полученных полуосях *a* и *b*. Для проверки того, есть или нет точек, находящихся за пределами границы эллипса, можно использовать соотношения, связывающие произвольную точку эллипса с его фокусами F_1 и F_2. а также большой полуосью.

Если $M(x_j', y_j')$ – точка на плоскости, а r_{1j} и r_{2j} – длины отрезков F_1M и F_2M соответственно, то для точки, принадлежащей эллипсу, $r_{1j} + r_{2j} = 2a$. Следовательно, точка $M(x_j', y_j')$ лежит вне кривой, формирующей эллипс, если $r_{1j} + r_{2j} > 2a$, $r_{1j} = \sqrt{\left(x_j' + c\right)^2 + (y_j')^2}$; $r_{1j} = \sqrt{\left(x_j' - c\right)^2 + (y_j')^2}$; $c = \sqrt{a^2 - b^2}$. Расстояние между фокусами равно *2c*.

Для формирования множества точек, которые находятся вне эллипса, определим для каждой точки $M(x'_j, y'_j)$ из множества M'_{T_k} значение $r_{12j} = r_{1j} + r_{2j}$, $j = 1,...,K-1$. Получим множество $\Omega = \left\{ r_{12j} \right\}_{j=1}^{K-1}$. Упорядочим элементы множества Ω по возрастанию и определим r_{12s} такое, что $r_{12s} \le 2a$, а $r_{12s+1} > 2a$, $s \in [1,...,K-1]$.

Тогда все точки множества M'_s, содержащие точки $M_{s+1}(x', y'),...,M_{K-1}(x', y')$, находятся вне эллипса с полуосями a и b. Для этих точек справедливы неравенства:

$$|x'_l| \le a, |y'_l| \le b, l = s+1,...,K-1.$$

Таким образом, точки $M_l(x'_l, y'_l)$ лежат в секторах, ограниченных линией эллипса и прямыми $x' = \pm a, y' = \pm b$.

В процессе построения эллипс должен растягиваться во всех направлениях по определенной схеме, которая должна быть одинакова как при обучении модели и определении значений критериев, так и при последующем использовании для классификации возникающих ситуаций. Расширение эллипса связано с увеличением a и b. Шаг изменения возьмем равным величине, определенной из заданного значения погрешности измерения осей эллипса σ. Шаг изменения a берем из соотношения $\Delta a \le \sigma \cdot a$. для b – $\Delta b \le \sigma \cdot b$.

Тогда адаптации формы эллипса под облако точек с учетом вышеприведенного этапа обработки данных, заключается в реализации итерационной схемы:

1. Увеличим a и b на Δa и Δb соответственно. Получим новые значения a и b.
2. Вычислим для всех точек множества M'_s значения $r_{12} = r_1 + r_2$. Получим соответствующее множество Ω.
3. Упорядочим элементы множества Ω в порядке возрастания и определим новое значение r_{12s} такое, что $r_{12s} \le 2a$, а $r_{12s+1} > 2a$.
4. Обновим состав точек множества M'_s с учетом п. 3.
5. Если $M'_s \ne \varnothing$, то возврат на п.1
6. Если $M'_s = \varnothing$, то окончательные значения a и b равны текущим с погрешностью σ.

Полученный в результате построений коэффициент сжатия эллипса $k = b/a$ позволит получить на этапе обучения модели значения критерия R_z для классов S_z, а на этапе классификации – оценки состояния объекта в процессе измерения его критичного параметра.

Моделирование этапов предварительной обработки и консолидации данных для построения модифицированной модели. Для апробации полученных результатов в качестве исходных данных рассматривать ускорение автомобиля по оси Y [11, 13, 14]. Классификация осуществлялась с помощью модели [15], дополненной разработанными процедурами отсеивание выбросов и формирования специализированного представления облака точек временного ряда параметра.

На предварительном этапе была использована предложенная модифицированная процедура Ирвина для отсеивания выбросов. В результате из исходного временного ряда был исключен ряд аномальных точек (выделены красным) с последующей их аппроксимацией с помощью параболической интерполяции, что видно на графике временного ряда (рис. 2).

Предложенная процедура построения эллипса на облаке точек участка временного ряда позволила достичь более адекватной имеющимся данным и точной оценки значения критерия, чем в исходной модели (рис. 3). Полученное значение критерия для участка 1 (рис. 2) R_z ,261 по сравнению с R_z ,299 в исходной модели [15] показывает, что модифицированная модель обеспечивает более жесткую оценку критерия.

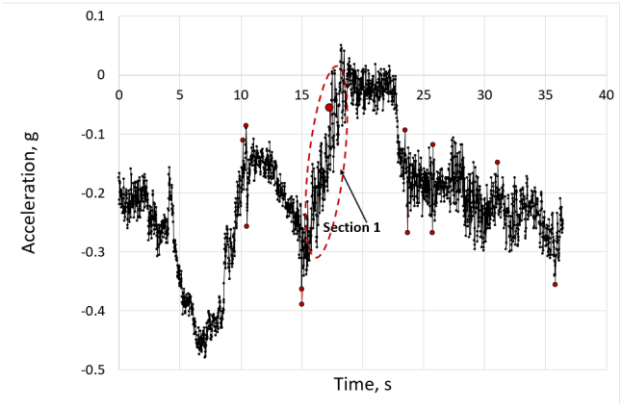


Рис. 2. Результат определения выбросов

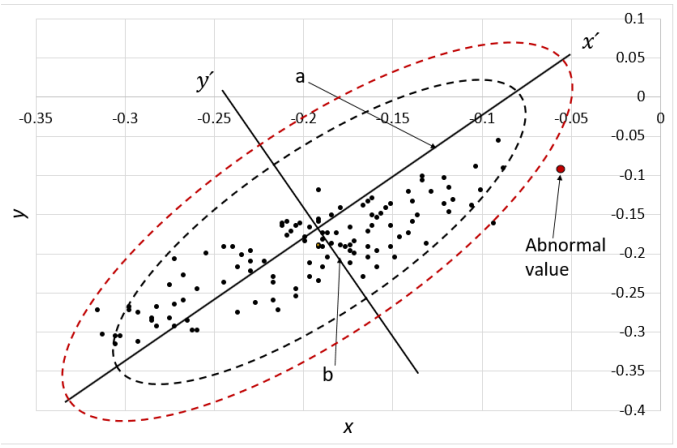


Рис. 3. Результат процесса формирования эллипса на облаке точек

На рис.3 красным выделена точка участка 1 исходного ряда, которая была идентифицирована как аномальная. Она не вошла в облако точек. на котором строился эллипс. Окончательный контур эллипса выделен красным цветом.

Заключение. Таким образом, в рамках предварительной подготовки данных предложена процедура выявления и отсеивания аномальных значений временного ряда параметра, основанная на модификации метода Ирвина.

Кроме того, представлена уточненная схема оценки значений критерия в модели классификации состояния параметра технического объекта. За критерий оценки взят коэффициент сжатия эллипса, который строится на облаке точек диаграммы рассеяния, вырезанных скользящим временным окном из временного ряда параметра. Для этого разработана итерационная процедура построения эллипса. Новая процедура обеспечивает более обоснованную и точную оценку критерия.

Модель позволит оценить в реальном времени возможность появления нештатной ситуации на ранней стадии ее развития. Процедура оценки может быть реализована в составе программно-аппаратных средств системы мониторинга технического объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Стеблев Ю.И., Сусарев С.В., Быков Д.Е.* Принципы проектирования автоматизированных систем диагностического мониторинга инженерных конструкций опасных производственных объектов // Российский журнал по неразрушающему контролю. – Апрель 2015. – Т. 51. – Вып. 4. – С. 185-197.

2. *Изергин Н.Д., Таров А.Г.* Оценка состояния технических объектов и их классификация методом парных сравнений // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – Вып. 5. – С. 164-167.
3. *Randall R.B.* Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. – John Wiley & Sons, 2011. – 285 p.
4. *Клячкин В.Н., Карпунина И.Н.* Статистические методы оценки стабильности функционирования технических систем // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 36-42. – DOI: 10.21685/2307-4205-2018-2-5.
5. *Detlev W. Gross.* Partial Discharge Measurement and Monitoring on Rotating Machines // IEEE Int. Sym. on Elect. Insul, Boston MAUSA. – April 7-10, 2002. – P. 33-41.
6. *Vovk S.P., Ginis L.A.* Modelling and forecasting of transitions between levels of hierarchies in Difficult formalized systems // European Researcher. – 2012. – Vol. (20), No. 5-1. – P. 541-545.
7. *Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалевский А.В.* Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Изд-во «Советское радио», 1974. – 224 с.
8. *Chuan Li, René-Vinicio Sánchez, Grover Zurita, Mariela Cerrada, Diego Cabrera*. Fault Diagnosis for Rotating Machinery Using Vibration Measurement Deep Statistical Feature Learning // Sensors. – 2016. – 16 (6). – 895. – https://doi.org/10.3390/s16060895.
9. *Матушевски Дж.* Применение методов кластеризации для распознавания технических объектов // Современные проблемы радиотехники, телекоммуникаций и информатики» (TCSET). Международная конференция. – 2010. – С. 39-40.
10. *Лихуа С., Инцзюнь Г., Хайчао Р.* Новый метод ранней диагностики неисправностей в реальном времени для технических процессов // Сб. трудов. Международная конференция по электротехнике и управлению (ICECE), 2 1 , Ухань, Китай, 2 1 . – С. 4912-4915.
11. *Клевцов С.И.* Оценка скорости изменения параметра на основе анализа его временных рядов // 3-я Международная конференция IEEE по проблемам информатики, электроники и радиотехники (PIERE), Новосибирск, Российская Федерация, 2 24. – DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10804947.
12. *Васильев В.В.* Современные проблемы компьютерного мониторинга в энергетике // Известия ТРТУ. – 2001. – Т. 3. – С. 99-120.
13. *Клевцов С.И.* Определение характера изменений параметра на основе анализа динамики формы совокупности его значений в реальном времени // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 46-55.
14. *Клевцов С.И.* Определение момента скачкообразного изменения быстропеременной физической величины в реальном времени с использованием диаграмм Пуанкаре // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 5. – С. 108-113.
15. *Клевцов С.И.* Классификация степени изменения параметра в реальном времени на основе анализа облака точек временного ряда // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 80-91.
16. *Позолотин В.Е., Султанова Е.А.* Применение алгоритмов преобразования данных при анализе временных рядов на предмет устранения выбросов // Программные системы и вычислительные методы. – 2019. – № 2. – С. 33-42. – DOI: 10.7256/2454-0714.2019.2.28279. – URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=28279.
17. *Заляжных В.В.* Расширение области применения критерия Ирвина при обнаружении аномальных измерений // Вестник СибГУТИ. – 2020. – № 2 – С. 95-104.
18. *Трофименко С.В., Трофименко С.В., Маршалов А.Я., Гриб Н.Н., Колодезников И.И.* Модификация метода Ирвина для выявления аномальных уровней временных рядов: методика и численные эксперименты // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – URL: https://science-educati n.ru/ru/artic e/view?id 1513 (дата обращения: 15. 2.2 25).
19. *Гуфельд И.Л., Гаврилов В.А., Корольков А.В. и Новоселов О.Н.* Эндогенная активность Земли и декомпрессионная модель сейсмического шума // Доклады Академии наук СССР. – 2008. – Т. 423, № 6. – С. 811-814.
20. *Новоселов О.Н.* Идентификация и анализ динамических систем: монография. – 3-е изд., перераб.и доп. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2 1 . – 424 с.

REFERENCES

1. *Steblev Yu.I., Susarev S.V., Bykov D.E.* Printsipy proektirovaniya avtomatizirovannykh sistem diagnosticheskogo monitoringa inzhenernykh konstruktsiy opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov [Principles of designing automated systems for diagnostic monitoring of engineering structures of hazardous industrial facilities], *Rossiyskiy zhurnal po nerazrushayushchemu kontrolyu* [Russian Journal of Non-Destructive Testing], Aprel' 2015, Vol. 51, Issue 4, pp. 185-197.

2. *Izergin N.D., Tarov A.G.* Otsenka sostoyaniya tekhnicheskikh ob"ektov i ikh klassifikatsiya metodom parnykh sravneniy [Assessment of the state of technical objects and their classification by the method of paired comparisons], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2017, Issue 5, pp. 164-167.
3. *Randall R.B.* Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. John Wiley & Sons, 2011, 285 p.
4. *Klyachkin V.N., Karpunina I.N.* Statisticheskie metody otsenki stabil'nosti funktsionirovaniya tekhnicheskikh sistem [Statistical methods for assessing the stability of functioning of technical systems], *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems], 2018, No. 2 (22), pp. 36-42. DOI: 10.21685/2307-4205-2018-2-5.
5. *Detlev W. Gross.* Partial Discharge Measurement and Monitoring on Rotating Machines, *IEEE Int. Sym. on Elect. Insul, Boston MAUSA,* April 7-10, 2002, pp. 33-41.
6. *Vovk S.P., Ginis L.A*. Modelling and forecasting of transitions between levels of hierarchies in Difficult formalized systems, *European Researcher,* 2012, Vol. (20), No. 5-1, pp. 541-545.
7. *Gaskarov D.V., Golinkevich T.A., Mozgalevskiy A.V.* Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti radioelektronnoy apparatury [Forecasting the technical condition and reliability of electronic equipment]. Moscow: Izd-vo "Sovetskoe radio", 1974, 224 p.
8. *Chuan Li, René-Vinicio Sánchez, Grover Zurita, Mariela Cerrada, Diego Cabrera*. Fault Diagnosis for Rotating Machinery Using Vibration Measurement Deep Statistical Feature Learning, *Sensors,* 2016, 16 (6), 895. Available at: https://doi.org/10.3390/s16060895.
9. *Matushevski Dzh.* Primenenie metodov klasterizatsii dlya raspoznavaniya tekhnicheskikh ob"ektov [Application of clustering methods for recognition of technical objects], *Sovremennye problemy radiotekhniki, telekommunikatsiy i informatiki» (TCSET). Mezhdunarodnaya konferentsiya* [Modern problems of radio engineering, telecommunications and informatics" (TCSET). International conference], 2010, pp. 39-40.
10. *Likhua S., Intszyun' G., Khaychao R.* Novyy metod ranney diagnostiki neispravnostey v real'nom vremeni dlya tekhnicheskikh protsessov [A new method for early diagnostics of faults in real time for technical processes], *Sb. trudov. Mezhdunarodnaya konferentsiya po elektrotekhnike i upravleniyu (ICECE), 2010, Ukhan', Kitay, 2010* [Collection of works. International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010, Wuhan, China, 2010], pp. 4912-4915.
11. *Klevtsov S.I.* Otsenka skorosti izmeneniya parametra na osnove analiza ego vremennykh ryadov [Estimation of the rate of change of a parameter based on the analysis of its time series], *3-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya IEEE po problemam informatiki, elektroniki i radiotekhniki (PIERE), Novosibirsk, Rossiyskaya Federatsiya, 2024* [3rd IEEE International Conference on Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, Russian Federation, 2024]. DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10804947.
12. *Vasil'ev V.V.* Sovremennye problemy komp'yuternogo monitoringa v energetike [Modern problems of computer monitoring in energy], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2001, Vol. 3, pp. 99-120.
13. *Klevtsov S.I.* Opredelenie kharaktera izmeneniy parametra na osnove analiza dinamiki formy sovokupnosti ego znacheniy v real'nom vremeni [Determining the nature of parameter changes based on the analysis of the dynamics of the shape of a set of its values in real time], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 3, pp. 46-55.
14. *Klevtsov S.I.* Opredelenie momenta skachkoobraznogo izmeneniya bystroperemennoy fizicheskoy velichiny v real'nom vremeni s ispol'zovaniem diagramm Puankare [Determining the moment of an abrupt chan e in a rapid y varyin physica quantity in rea time usin P incaré dia rams], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 5, pp. 108-113.
15. *Klevtsov S.I.* Klassifikatsiya stepeni izmeneniya parametra v real'nom vremeni na osnove analiza oblaka tochek vremennogo ryada [Classification of the degree of change of a parameter in real time based on the analysis of a point cloud of a time series], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 4, pp. 80-91.
16. *Pozolotin V.E., Sultanova E.A.* Primenenie algoritmov preobrazovaniya dannykh pri analize vremennykh ryadov na predmet ustraneniya vybrosov [Application of data transformation algorithms in the analysis of time series for the purpose of eliminating outliers], *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody* [Software systems and computational methods], 2019, No. 2, pp. 33-42. DOI: 10.7256/2454-0714.2019.2.28279. Available at: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=28279.
17. *Zalyazhnykh V.V.* Rasshirenie oblasti primeneniya kriteriya Irvina pri obnaruzhenii anomal'nykh izmereniy [Expanding the scope of application of the Irwin criterion in detecting anomalous measurements], *Vestnik SibGUTI* [The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science], 2020, No. 2, pp. 95-104.

18. *Trofimenko S.V., Trofimenko S.V., Marshalov A.Ya., Grib N.N., Kolodeznikov I.I.* Modifikatsiya metoda Irvina dlya vyyavleniya anomal'nykh urovney vremennykh ryadov: metodika i chislennye eksperimenty [Modification of the Irwin method for identifying anomalous levels of time series: methodology and numerical experiments], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, № 5. Available at: https://science-education.ru/ru/article/view?id=15130 (accessed 15 February 2025).
19. *Gufel'd I.L., Gavrilov V.A., Korol'kov A.V. i Novoselov O.N.* Endogennaya aktivnost' Zemli i dekompressionnaya model' seysmicheskogo shuma [Endogenous activity of the Earth and decompression model of seismic noise], *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 2008, Vol. 423, No. 6, pp. 811-814.
20. *Novoselov O.N.* Identifikatsiya i analiz dinamicheskikh sistem: monografiya [Identification and analysis of dynamic systems: monograph]. 3rd ed. Moscow: GOU VPO MGUL, 2010, 424 p.

Клевцов Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: sergkmps@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634328 25; к.т.н.; доцент.

Klevtsov Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: sergkmps@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634328025; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 4.89 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-57-69

В.А. Частикова, А.С. Бахтин, П.А. Меркулов

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНТЕГРАЦИИ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЫ ЦЕНТРА МОНИТОРИНГА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Показана важность интеграции больших языковых моделей (БЯМ) в процессы центров мониторинга информационной безопасности (SOC) для повышения их эффективности в условиях растущих киберугроз. Цель исследования – разработка методики интеграции БЯМ в SOC, направленной на автоматизацию процессов анализа данных и реагирования на инциденты. Задачи исследования включают теоретическое обоснование и разработку платформы для безопасного внедрения БЯМ, а также оценку существующих процессов и технической инфраструктуры SOC. В статье анализируются ключевые метрики эффективности работы SOC, такие как среднее время обнаружения инцидента и количество нерешенных инцидентов, и предлагается использование подхода GQM (Goal-Question-Metric) для разработки этих метрик. Рассматривается также необходимость оценки рисков, связанных с использованием БЯМ, с учетом уязвимостей и угроз, а также методов их минимизации, включая использование списка критических уязвимостей от OWASP. В статье предложены основные этапы разработки и внедрения системы, включая инвентаризацию существующих ресурсов, анализ сложности интеграции и развертывание системы. Рассматриваются ключевые аспекты, такие как оценка сложности интеграции, эксплуатационные и поддерживающие факторы, а также оценка рисков, связанных с внедрением новых технологий в инфраструктуру SOC. В заключение подчеркивается актуальность использования БЯМ для улучшения оперативности и качества работы SOC, что способствует повышению уровня информационной безопасности и ускорению реакции на киберугрозы. Внедрение таких технологий позволит SOC не только быстрее реагировать на инциденты, но и повысить точность анализа данных, снижая риски, связанные с человеческим фактором.

Автоматизация; инцидент; большая языковая модель; генеративный искусственный интеллект; центр мониторинга информационной безопасности.

V.A. Chastikova, A.S. Bahtin, P.A. Merkulov

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR INTEGRATING LARGE LANGUAGE MODELS INTO THE PROCESSES OF SECURITY OPERATIONS CENTERS

The article discusses the importance of integrating large language models (LLMs) into information security monitoring center processes (SOCs) to increase their effectiveness in dealing with growing cyber threats. The aim of the research is to develop a method for incorporating LLMs into SOCs aimed at automating data analysis and incident response processes. The research goals include the theoretical justifica-

tion for and development of a safe LLM implementation platform, as well as assessing existing SOC processes and technical infrastructure. The article analyses key SOC metrics such as average incident detection times and the number of outstanding incidents, and proposes using the GQM approach to improve these metrics.. It also considers the need to assess the risks associated with the use of LLM, taking into account vulnerabilities and threats, as well as methods for minimizing them, including using the OWASP list of critical vulnerabilities. The article suggests the main stages of system development and implementation, including inventory of existing resources, analysis of integration complexity and system deployment. Key aspects such as assessing the complexity of integration, operational and supporting factors, as well as assessing risks associated with introducing new technologies into SOC infrastructure, are considered. In conclusion, the relevance of LLM use is emphasized to improve efficiency and quality of SOC work, contributing to increased information security level and faster response to cyberthreats. The introduction of such technologies will allow SOC to not only respond faster to incidents, but also improve the accuracy of data analysis and reduce the risks associated with the human factor.

LLM; information security; security operations center; artificial intelligent; automatization.

Введение. Киберугрозы становятся всё более опасными, поэтому информационная безопасность организаций приобретает большое значение. Центры мониторинга информационной безопасности (SOC) играют важную роль, непрерывно отслеживая и анализируя системы для предотвращения угроз [1].

Ручной анализ больших объёмов данных требует много времени и усилий, что замедляет обнаружение и реакцию на угрозы.

Автоматизация процессов в SOC значительно повышает их эффективность, охватывая сбор и анализ данных, а также реагирование на инциденты. Это позволяет улучшить работу аналитиков, ускорить выявление угроз и снизить затраты на безопасность [2].

Обоснование необходимости интеграции больших языковых моделей в SOC. Современные центры мониторинга и реагирования на инциденты (SOC) испытывают трудности из-за увеличения количества и сложности киберугроз [3]. Аналитики прогнозируют рост использования искусственного интеллекта для атак в ближайшие годы. В этих условиях автоматизация процессов в SOC становится критически важной для повышения эффективности работы и ускорения реакции на угрозы.

Ключевым элементом такой автоматизации являются модели генеративного ИИ, однако их внедрение связано с рисками, требующими тщательного контроля. Поэтому необходимо разработать методику интеграции больших языковых моделей в процессы SOC, которая будет учитывать основные принципы разработки и эксплуатации таких систем, а также предложит соответствующую архитектуру решения.

Обзор современных научных исследований. Обзор современных исследований показывает, что LLM применяется в сфере кибербезопасности для генерации политик безопасности и автоматизации реагирования на инциденты [4]. Некоторые исследования посвящены автоматизации первичного анализа оповещений (tria e), снижению когнитивной нагрузки на аналитиков SOC и снижению частоты ложных срабатываний на 87% [5, 6]. Статья Arthur Hermann показывает, что большие языковые модели могут быть использованы для классификации логов безопасности на безопасные (beni n) и вредоносные (ma ici us), но пока что это неприменимо для мультиклассовой классификации, а только для бинарной [7].

Предложенный фреймворк Ru e-ATT&CK Mapper (RAM) использует большие языковые модели для сопоставления правил SIEM с техниками MITRE ATT&CK [8]. А в сочетании с Ru eGenie правила для SIEM можно оптимизировать с помощью векторизации правил и поиску похожих по косинусной близости [9].

Возможна также интеграция LLM с блокчейном и квантовой криптографией, необходима разработка нормативных документов для ИИ [1].

Также HuntGPT – прототип для обнаружения сетевых аномалий, имеет высокий потенциал благодаря сочетанию машинного обучения (ML), объяснимого искусственного интеллекта (xAI) и больших языковых моделей (LLM). Инструмент может оказаться полезным для малых или средних SOC-команд [11].

Исследование Openime Onia bi рекомендует использовать LLM как «копилотов» для аналитиков SOC, а не полностью автономных агентов так как при использовании БЯМ часто возникают галлюцинации [12].

LLM применяются в различных доменах кибербезопасности – в анализе кода, анализе сетевого трафика, обнаружении фишинга, а также в блокчейне [13].

Основные подходы и концепции, используемых при разработке методики. Методика предназначена для разработки подхода к интеграции больших языковых моделей (БЯМ) в инфраструктуру SOC (Security Operati ns Center), обеспечивая безопасное и эффективное взаимодействие с уже существующими системами [14].

Основные принципы интеграции:

- платформенный подход – интеграция больших языковых моделей должна осуществляться через гибкую программную платформу;
- использование моделей в SOC – предпочтение должно отдаваться локальным экземплярам моделей для лучшего контроля данных;
- поддержка стандартных API и форматов – система должна поддерживать общепринятые механизмы взаимодействия и протоколы для совместимости с другими системами;
- асинхронность – система не должна блокировать работу при ожидании обработки запросов;
- масштабируемость – возможность горизонтального масштабирования;
- отказоустойчивость – система должна эффективно перераспределять нагрузку при отказах.

Кроме того, для обеспечения безопасности взаимодействия с моделями должны быть выполнены следующие условия:

- защищенные каналы передачи данных с шифрованием;
- аутентификация и авторизация для защиты доступа к платформе и её данным;
- ролевая модель доступа для ограничения доступа к моделям;
- интеграция с существующими системами аутентификации.

Эти принципы обеспечивают качество и безопасность взаимодействия, создавая основу для интеграции моделей в процессы SOC.

Также важны принципы взаимодействия с моделями:

- интерактивность – система на базе генеративного ИИ должна уметь обрабатывать запросы в реальном времени;
- актуальность – учет контекста запросов и предыдущих взаимодействий для предоставления актуальных данных;
- гибкость – система должна обеспечивать заменяемость моделей без зависимости от конкретных реализаций.

Применение этих принципов создаст эффективную платформу для интеграции больших языковых моделей в процессы SOC.

Описание методики интеграции больших языковых моделей. Предлагаемая методика ориентирована на теоретическое обоснование интеграции больших языковых моделей для автоматизации процессов SOC. Её цель – разработка и внедрение платформы, обеспечивающей безопасное и организованное взаимодействие с такими моделями в рамках SOC.

Методика включает следующие этапы:

1. Анализ текущих процессов SOC, определение целей и задач интеграции.
2. Оценка существующей инфраструктуры, выявление точек интеграции и разработка сценариев развертывания.
3. Оценка рисков, связанных с использованием больших языковых моделей.
4. Разработка и развертывание системы.
5. Введение в эксплуатацию.
6. Корректировка системы на основе анализа метрик.

Анализ и оценка процессов SOC. Этот этап включает оценку текущих процессов SOC, определение целей интеграции и выбор задач для автоматизации. Анализируются метрики эффективности, такие как среднее время обнаружения инцидента (MTTD) и ко-

личество нерешенных инцидентов. Метрики могут разрабатываться с использованием подхода GQM (G a -Question-Metric), который помогает формулировать цели, вопросы и соответствующие показатели для оценки процессов SOC [15].

Таблица 1

Подход GQM для определения метрик

Цель	Вопрос	Метрика
Эффективное реагирование на инциденты	Насколько быстро происходит реагирование на инцидент?	Среднее время реагирования на инцидент или медианное время реагирования на инцидент
Увеличение автономности SOC	Сколько процессов автоматизировано?	Количество автоматизированных процессов или коэффициент автоматизированных процессов

При разработке метрик необходимо учитывать следующие факторы:

- метрики должны соответствовать целям и задачам SOC;
- метрики должны помогать в принятии решений;
- их цель и ценность должны быть очевидны как для внутренних сотрудников, так и для внешних потребителей, услуг и сервисов;
- метрики должны быть реалистичными с точки зрения сбора и точности данных;
- сбор и анализ метрик должны по возможности происходить автоматически.

Для этого можно использовать модель SMART (Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time-based; конкретность, измеримость, достижимость, актуальность и привязанность ко времени). Также важно учитывать зрелость процессов, для чего можно применить модель оценки процессов PAM из методологии COBIT 5 (с учетом ГОСТ Р ИСО/МЭК 155 4-2-2 9 Информационная технология (ИТ). Оценка процесса. Часть 2. Проведение оценки), которая оценивает вероятность достижения ожидаемых результатов процессов. В соответствии с указанной моделью выделяются уровни зрелости, указанные в табл. 2.

Таблица 2

Уровни зрелости процесса

Уровень	Обозначение уровня зрелости	Описание уровня зрелости
0	Неполный процесс	Такой процесс еще не внедрен или не способен соответствовать своему назначению. Например, основные процессы SOC отсутствуют
1	Осуществленный процесс	Осуществленный процесс достиг своего назначения. Например, процесс обработки инцидентов информационной безопасности реализован, но не документирован
2	Управляемый процесс	Процесс выполняется управляемым образом (планируется, регулируется и проводится его мониторинг), а его рабочие продукты соответствующим образом установлены, контролируются и поддерживаются. Например, имеются метрики инцидентов информационной безопасности

Окончание табл. 2

Уровень	Обозначение уровня зрелости	Описание уровня зрелости
3	Установленный процесс	Управляемый процесс на данном уровне осуществляется с использованием определенного процесса, который способен достичь выходов этого процесса. Например, есть документированный процесс обработки инцидентов информационной безопасности, метрики инцидентов документированы
4	Предсказуемый процесс	Процесс на данном уровне осуществляется в определенных пределах для достижения выходов этого процесса. Например, целевые показатели по выявлению и обработке инцидентов задокументированы и выполняются
5	Оптимизирующий процесс	Предсказуемый процесс на данном уровне непрерывно улучшается для достижения соответствующих текущих и планируемых бизнес-целей. Например, проводится регулярная оценка эффективности SOC, производится выстраивание процессов для достижения максимальных ключевых показателей эффективности

Для определения процессов, подлежащих автоматизации, необходимо оценить основные метрики SOC и зрелость процессов, чтобы выявить те, которые требуют улучшения. Время для расчета метрик определяется в зависимости от специфики SOC. Пример оценки типовых метрик за определенный промежуток времени приведен в табл. 3.

Таблица 3

Оценка метрик за условный временной промежуток

Метрика	Оценка за текущий период	Оценка за предыдущий период	Изменение в процентах
Среднее время обнаружения (MTTD)	54 минуты	48 минут	11.11%
Среднее время расследования (MTTI)	6 минут	57 минут	5.00%
Среднее время сдерживания (MTTC)	48 минут	42 минут	-12.50%
Среднее время восстановления (MTTR)	33 минут	36 минут	-8.33%
Количество инцидентов	200	150	33.33%
Коэффициент закрытых инцидентов	0.85	0.80	6.25%
Количество ложноположительных оповещений	55	60	-8.33%
Количество инцидентов на аналитика	11	10	10.00%

Необходимо составить матрицу влияния процессов на метрики, где влияние и сложность оцениваются по шкале от до 3 (отсутствует – , низкое – 1, среднее – 2, высокое – 3). Аналогичным образом оценивается степень автоматизации. Система баллов может быть расширена, если потребуется. Пример для временных метрик приведен в табл. 4.

Таблица 4

Влияние процессов на ключевые метрики SOC

Процесс SOC	Среднее время обнаружения (MTTD)	Среднее время расследования (MTTI)	Среднее время сдерживания (MTTC)	Среднее время восстановления (MTTR)
Сбор информации об инцидентах	Высокое	Высокое	Среднее	Среднее
Сбор данных о киберугрозах	Высокое	Высокое	Высокое	Среднее
Повышение квалификации персонала	Низкое	Среднее	Среднее	Среднее
Составление планов реагирования на инциденты	Низкое	Высокое	Высокое	Высокое
Расследование инцидентов	Низкое	Высокое	Высокое	Высокое

На основе перечня процессов и уровней зрелости необходимо определить сценарии автоматизации с помощью ИИ, оценить их влияние на процессы, степень автоматизации и сложность реализации. Влияние рассчитывается как среднее арифметическое значений влияния процесса на метрики, округленное до ближайшего целого. Пример оценки процессов и сценариев автоматизации приведен в табл. 5.

Таблица 5

Оценка процессов

Процесс	Уровень зрелости	Сценарий автоматизации с помощью ИИ	Влияние на процессы	Сложность автоматизации	Степень автоматизации
Сбор информации об инцидентах	3	Генерация отчетов на основе логов инцидентов	Высокое	Низкая	Полная
Сбор данных о киберугрозах	2	Предоставление и интерпретация информации относительно запроса специалиста	Высокое	Средняя	Частичная
Повышение квалификации персонала	3	Предоставление и интерпретация информации относительно запроса специалиста	Среднее	Низкая	Частичная
Составление планов реагирования на инциденты	3	Составление «плейбуков» для инцидентов на основе уже существующих	Высокое	Высокая	Частичная
Расследование инцидентов	3	Ассистирование с помощью поиска релевантной информации	Высокое	Высокая	Частичная

На основе данных из таблицы необходимо приоритизировать процессы по принципу «от простого к сложному» с учетом следующих критериев сортировки:

1. Возрастание сложности автоматизации.
2. Возрастание степени автоматизации.
3. Убывание влияния на процессы.
4. Убывание уровня зрелости.

При совпадении значений приоритет определяется произвольно.

Таблица 6

Приоритет автоматизации процессов

Приоритет	Процесс	Сценарий автоматизации с помощью ИИ	Уровень зрелости	Влияние на процессы	Сложность автоматизации	Степень автоматизации
1	Повышение квалификации персонала	Предоставление и интерпретация информации относительно запроса специалиста	3	Среднее	Низкая	Частичная
2	Сбор данных о киберугрозах	Предоставление и интерпретация информации относительно запроса специалиста	2	Высокое	Средняя	Частичная
3	Сбор информации об инцидентах	Генерация отчетов на основе логов инцидентов	3	Высокое	Средняя	Полная
4	Составление планов реагирования на инциденты	Составление «плейбуков» для инцидентов на основе уже существующих	3	Высокое	Высокая	Частичная
5	Расследование инцидентов	Ассистирование с помощью поиска релевантной информации	3	Высокое	Высокая	Частичная

Полученный список используется для определения целей и задач интеграции. Например, для процесса повышения квалификации персонала целью автоматизации с помощью ИИ является улучшение осведомленности специалистов SOC. Задачи автоматизации включают:

- предоставление интерфейса для запросов по информационной безопасности;
- обеспечение эффективности взаимодействия с платформой;
- поддержание актуальности данных для работы с большими языковыми моделями.

Оценка существующей технической инфраструктуры и составление сценариев интеграции. На этом этапе необходимо провести инвентаризацию существующих систем и аппаратных ресурсов в SOC. Затем следует проанализировать их возможность интеграции с новой системой, оценив сложность интеграции, эксплуатации и поддержки каждой из них.

Таблица 7

Пример оценки существующих систем

Система	Тип системы	Механизмы интеграции	Сценарии интеграции	Сложность поддержки и эксплуатации	Сложность интеграции
Security Vision	SOAR	Коннекторы	Разработка коннектора и сценариев применения в no-code/low-code платформе	Низкая	Средняя
MaxPatrol SIEM	SIEM	REST API	Разработка логики взаимодействия в коде интегрируемой платформы; разработка интеграционного скрипта	Высокая	Высокая
MaxPatrol EDR	EDR	Разработка интеграционного модуля	Разработка модуля с помощью Lua-кода	Высокая	Высокая

Исходя из таблицы видно, что наибольшую способность к интеграции демонстрируют SOAR системы, которые являются не только инструментами реагирования на инциденты, но и платформами для интеграции. Для SOC предпочтительнее выбирать такие интеграционные платформы. Если SOAR-система отсутствует, следует рассмотреть её добавление. В случае невозможности внедрения SOAR или аналогичных систем, можно изучить возможность интеграции с текущими решениями через скрипты или разработку интеграционных модулей. Рис. 1 иллюстрирует пример точки интеграции с инфраструктурой SOC [16].

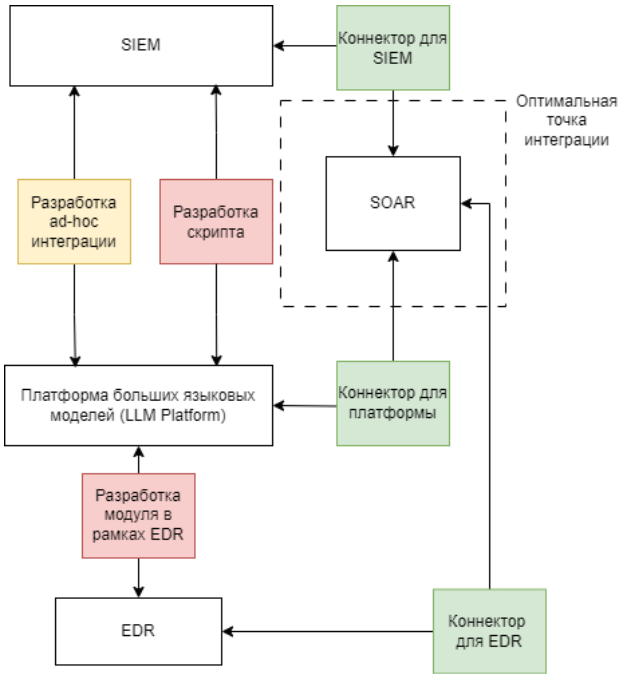


Рис. 1. Пример определения точки интеграции в рамках SOC

На рис. 2 изображено схематическое расположение интегрируемой системы в инфраструктуре SOC.

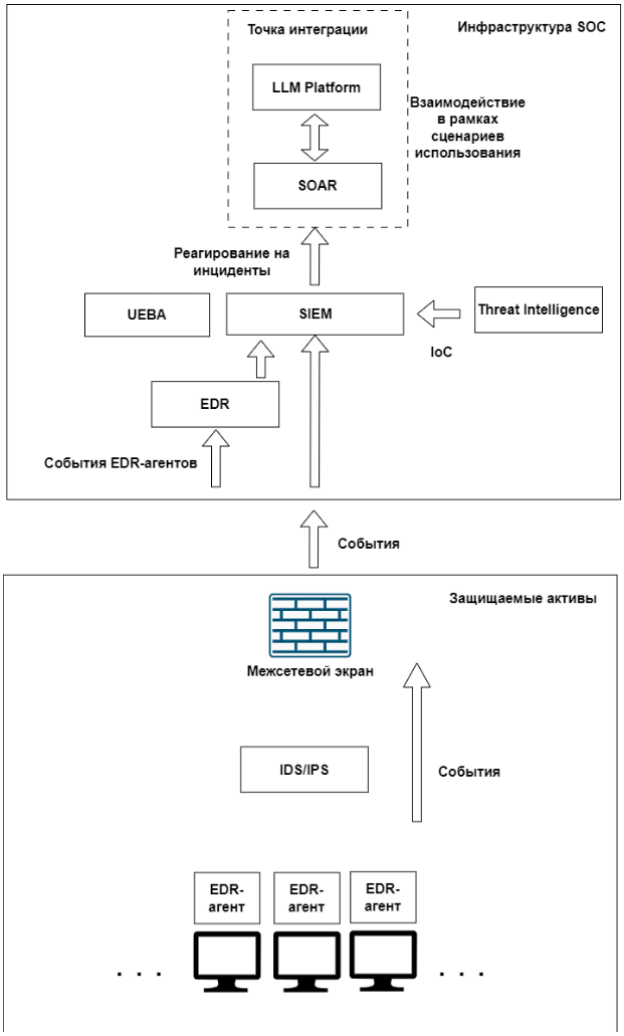


Рис. 2. Расположение интегрированной системы в инфраструктуре SOC

Следующий шаг – описание потоков данных в инфраструктуре SOC для автоматизации с использованием больших языковых моделей. Пример диаграммы данных приведен на рис. 3.

Описание данных позволяют понимать каким образом данные двигаются в рамках процессов, а также позволяют оценить потенциал интеграции.

Для ответственных задач следует рассматривать развертывание на физических, выделенных или облачных серверах с GPU [17]. Наиболее безопасным вариантом является использование физического GPU-сервера в инфраструктуре SOC, но это увеличивает затраты на интеграцию [18]. Альтернативой может быть подключение моделей через API официальных поставщиков, однако это сопряжено с риском утечки чувствительных данных, поэтому такой подход допустим только при отсутствии конфиденциальной информации в автоматизируемых процессах. Характеристики пяти возможных сценариев развертывания приведены в табл. 8.

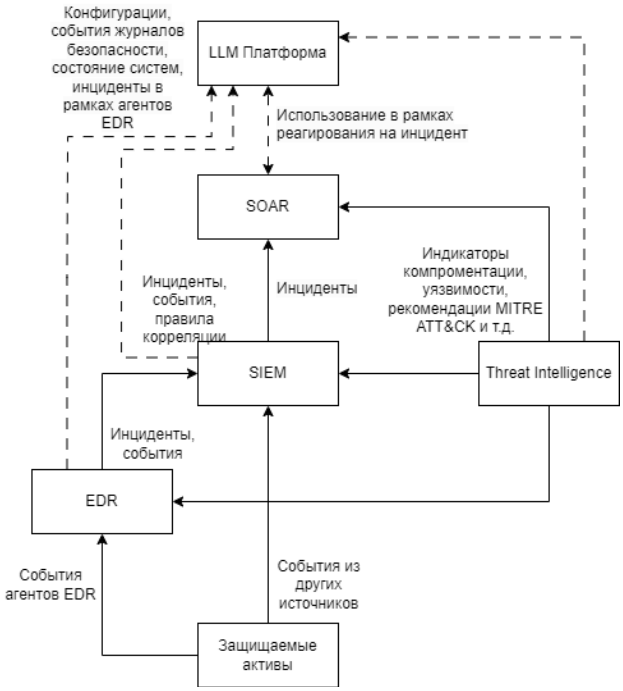


Рис. 3. Пример диаграммы описания данных в инфраструктуре SOC

Таблица 8

Сценарии развертывания моделей

Сценарий развертывания	Эффективность	Затраты	Контроль данных
Локально на центральном процессоре	Низкая	Низкие	Высокий
Локально на GPU-сервере	Высокая	Высокие	Высокий
На выделенном сервере	Высокая	Высокие	Средний
На облачном сервере	Высокая	Средние	Средний
С помощью поставщика моделей	Высокая	Низкие	Низкий

Поскольку автоматизаций процессов может быть много, для каждого процесса выбирается свой сценарий развертывания. Это обеспечивает гибкость и масштабируемость использования ресурсов без привязки к одному конкретному сценарию.

Оценка и учет рисков связанных с большими языковыми моделями. При интеграции больших языковых моделей необходимо учитывать их уязвимости и связанные угрозы. Для оценки, необходимо обратиться к ресурсу OWASP, который описывает 1 самых распространённых уязвимостей БЯМ [19].

Данные уязвимости необходимо учитывать при разработке платформы.

Разработка и развертывание системы. На данном этапе проводится разработка, проверка, конфигурация и развертывание системы. Несмотря на отсутствие специализированных LLM-платформ для SOC, наблюдается активное развитие данной области. Предполагается, что решение уже разработано или разрабатывается в рамках компании. Архитектура решения описана в следующем разделе.

Перед развертыванием необходимо убедиться в соблюдении ряда требований безопасности:

♦ секреты и аутентификационные данные должны храниться в безопасных хранилищах;

♦ файлы моделей и актуальные данные должны быть защищены от несанкционированного доступа;

♦ доступ к моделям должен быть ограничен на уровне сети, а сами модели должны поступать из надежных источников.

После этого следует развертывание системы, настройка интеграции, составление сценариев использования и первичное тестирование. Оцениваются метрики эффективности, на основе которых выполняется дополнительная настройка конфигураций и скриптов. Важным шагом является настройка механизмов актуализации данных. При необходимости проводится дообучение моделей под конкретный контекст SOC.

После успешного развертывания система вводится в эксплуатацию. На этом этапе оцениваются метрики эффективности работы системы, такие как медианное время ответа, время импорта данных, коэффициенты "галлюцинаций" и неверных ответов, коэффициент выполненных процессов автоматизации, среднее время простоя. На основе полученных данных проводятся доработки и планируются улучшения.

В процессе эксплуатации оцениваются ключевые метрики SOC и интегрированного решения, и на основе их анализа производится корректировка функционирования системы [2].

Заключение. В данной статье показана актуальность и необходимость разработки методики интеграции больших языковых моделей в процессы центра мониторинга информационной безопасности, описаны основные принципы и этапы интеграции.

По результату внедрения БЯМ в инфраструктуру SOC достигается не только повышение оперативности реакции, но и улучшение качества анализа данных. Так же интеграция, проведенная по правильной методике, позволяет вносить в систему изменения без необходимости вмешательства в основные рабочие процессы, что способствует минимизации сбоев и повышению общей отказоустойчивости системы.

Рассмотренный сценарий применения доказывает эффективность технологий ИИ в роли средства автоматизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Центр мониторинга информационной безопасности (Security Operati ns Center, SOC). – URL: https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/security-operations-center-soc.
2. *Частикова В.А., Митюгов А.И.* Методика построения системы анализа инцидентов информационной безопасности на основе нейроиммунного подхода // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2022. – № 1. – С. 98-105.
3. Национальная база данных уязвимостей. – URL: https://nvd.nist.gov/vuln.
4. *Hasanov I., Virtanen S., Hakkala A., Isoaho J.* Application of Large Language Models in Cybersecurity: A Systematic Literature Review // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 176751-176778. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3505983.
5. *Singh Y., Patel N.D., Shandilya S.K.* Enhancing Security Operations Center Efficiency through Multi-Model Integration of Large Language Models and SIEM Systems // Preprints. – 2024. – DOI: 10.21203/rs.3.rs-5615639/v1.
6. *Kotilingala S.* Leveraging large language models for enhanced threat detection in security operations centers // World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – P. 579-591. – URL: https://doi.org/10.30574/wjaets.2025.15.1.0241 – DOI: 10.30574/wjaets.2025.15.1.0241.
7. *Hermann A.* GPT Powered Log Analysis: Enhancing SOC Decision Making for Malicious and Benign Security Log Classification // Twente Student Conference on IT (TSeIT 41). – Enschede, Netherlands, 2024. – P. 1-6.
8. *Wudali P.N., Kravchik M., Malul E., Gandhi P.A., Elovici Y.* A. Shabtai Rule-ATT&CK Mapper (RAM): Mapping SIEM Rules to TTPs Using LLMs // arXiv preprint. – 2024. – URL: https://arxiv.org/abs/2502.02337v1.
9. *Shukla A., Gandhi P.A., Elovici Y., Shabtai A.* RuleGenie: SIEM Detection Rule Set Optimization // arXiv. – 2024. – URL: https://arxiv.org/abs/2505.06701v1.
10. *Zangana H.M., Mohammed H.S., Husain M.M.* The Role of Large Language Models in Enhancing Cybersecurity Measures: Empirical Evidence from Regional Banking Institutions // Sistemasi: Jurnal Sistem Informasi. – 2025. – Vol. 14, No. 5. – P. 2018–2027. – URL: https://sistemasi.ftik.unisi.ac.id/index.php/stmsi/article/download/5144/1029.

11. *Ali T., Kostakos P.* HuntGPT: Integrating Machine Learning-Based Anomaly Detection and Explainable AI with Large Language Models (LLMs) // arXiv. – 2023. – URL: https://arxiv.org/abs/2309.16021v1. – DOI: 10.48550/arXiv.2309.16021.
12. *Oniagbi O., Hakkala A., Hasanov I.* Evaluation of LLM Agents for the SOC Tier 1 Analyst Triage Process // University of Turku. – 2024. – 62 p. – URL: https://www.utupub.fi/bitstream/handle/10024/178601/Oniagbi_Openime_Thesis.pdf?sequence=1.
13. *Ali A., Ghanem M.C.* Beyond Detection: Large Language Models and Next-Generation Cybersecurity // SHIFRA. – 2025. – Vol. (2025). – P. 81-97. – ISSN: 3078-3186. – URL: https://www.researchgate.net/publication/390931574_Beyond_Detection_Large_Language_Models_and_Next-Generation_Cybersecurity.
14. *Частикова В.А., Гуляй В.Г.* Подход к построению систем анализа инцидентов информационной безопасности на основе гибридизации методов машинного обучения // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2023. – № 6. – С. 1 7-117.
15. Key SOC metrics and KPIs: How to define and use them. – URL: https://www.techtarget.com/searchsecurity/tip/How-SOC-metrics-improve-security-operation-centers-performance.
16. *Селезнёв В.М., Боровская О.Е.* Встраивание инструментов SOAR-платформ в экосистему SOC для автоматизации процесса реагирования на инциденты ИБ // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 10 (124). – URL: https://research-journal.org/archive/10-124-2022-october/10.23670/IRJ.2022.124.8. – DOI: 10.23670/IRJ.2022.124.8.
17. Running Local LLMs, CPU vs. GPU - a Quick Speed Test. – URL: https://dev.to/maximsaplin/running-local-llms-cpu-vs-gpu-a-quick-speed-test-2cjn.
18. CPU vs GPU for Running LLMs Locally. – URL: https://www.marktechpost.com/2024/03/23/cpu-vs-gpu-for-running-llms-locally/.
19. OWASP Top 10 for LLM Applications. – URL: https://owasp.org/www-project-top-10-for-large-language-model-applications/assets/PDF/OWASP-Top-10-for-LLMs-2023-v1_1.pdf.
20. *Бахтин А.С.* Разработка методики интеграции больших языковых моделей в процессы центра мониторинга информационной безопасности: дипломная работа по специальности 1 . 5. 3 «Информационная безопасность автоматизированных систем». – Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 2 24. – 93 с.

REFERENCES

1. Tsentr monitoringa informatsionnoy bezopasnosti (Security Operations Center, SOC) [Information Security Monitoring Center (Security Operations Center, SOC)]. Available at: https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/security-operations-center-soc.
2. *Chastikova V.A., Mityugov A.I.* Metodika postroeniya sistemy analiza intsidentov informatsionnoy bezopasnosti na osnove neyroimmunnogo podkhoda [Methodology for building a system for analyzing information security incidents based on a neuroimmune approach], *Elektronnyy setevoy politematicheskiy zhurnal "Nauchnye trudy KubGTU"* [Electronic network political journal "Scientific Works of KubSTU"], 2022, No. 1, pp. 98-105.
3. Natsional'naya baza dannykh uyazvimostey [National Vulnerability Database]. Available at: https://nvd.nist.gov/vuln.
4. *Hasanov I., Virtanen S., Hakkala A., Isoaho J.* Application of Large Language Models in Cybersecurity: A Systematic Literature Review, *IEEE Access,* 2024, Vol. 12, pp. 176751-176778. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3505983.
5. *Singh Y., Patel N.D., Shandilya S.K.* Enhancing Security Operations Center Efficiency through Multi-Model Integration of Large Language Models and SIEM Systems, *Preprints,* 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-5615639/v1.
6. *Kotilingala S.* Leveraging large language models for enhanced threat detection in security operations centers, *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences,* 2025, Vol. 15, No. 1, pp. 579-591. Available at: https://doi.org/10.30574/wjaets.2025.15.1.0241 DOI: 10.30574/wjaets.2025.15.1.0241.
7. *Hermann A.* GPT Powered Log Analysis: Enhancing SOC Decision Making for Malicious and Benign Security Log Classification, *Twente Student Conference on IT (TSeIT 41)*. Enschede, Netherlands, 2024, pp. 1-6.
8. *Wudali P.N., Kravchik M., Malul E., Gandhi P.A., Elovici Y.* A. Shabtai Rule-ATT&CK Mapper (RAM): Mapping SIEM Rules to TTPs Using LLMs, *arXiv preprint,* 2024. Available at: https://arxiv.org/abs/2502.02337v1.
9. *Shukla A., Gandhi P.A., Elovici Y., Shabtai A.* RuleGenie: SIEM Detection Rule Set Optimization, *arXiv,* 2024. Available at: https://arxiv.org/abs/2505.06701v1.

10. *Zangana H.M., Mohammed H.S., Husain M.M.* The Role of Large Language Models in Enhancing Cybersecurity Measures: Empirical Evidence from Regional Banking Institutions, *Sistemasi: Jurnal Sistem Informasi,* 2025, Vol. 14, No. 5, pp. 2018–2027. Available at: https://sistemasi.ftik.unisi.ac.id/index.php/stmsi/article/download/5144/1029.
11. *Ali T., Kostakos P.* HuntGPT: Integrating Machine Learning-Based Anomaly Detection and Explainable AI with Large Language Models (LLMs), *arXiv,* 2023. Available at: https://arxiv.org/abs/2309.16021v1. – DOI: 10.48550/arXiv.2309.16021.
12. *Oniagbi O., Hakkala A., Hasanov I.* Evaluation of LLM Agents for the SOC Tier 1 Analyst Triage Process, *University of Turku,* 2024, 62 p. Available at: https://www.utupub.fi/bitstream/handle/10024/178601/Oniagbi_Openime_Thesis.pdf?sequence=1.
13. *Ali A., Ghanem M.C.* Beyond Detection: Large Language Models and Next-Generation Cybersecurity, *SHIFRA,* 2025, Vol. (2025), pp. 81-97. ISSN: 3078-3186. Available at: https://www.researchgate.net/publication/390931574_Beyond_Detection_Large_Language_Models_and_Next-Generation_Cybersecurity.
14. *Chastikova V.A., Gulyay V.G.* Podkhod k postroeniyu sistem analiza intsidentov informatsionnoy bezopasnosti na osnove gibridizatsii metodov mashinnogo obucheniya [An approach to building systems for analyzing information security incidents based on the hybridization of machine learning methods], *Elektronnyy setevoy politematicheskiy zhurnal "Nauchnye trudy KubGTU"* [The electronic network political journal "Scientific works of KubSTU"], 2023, No. 6, pp. 107-117.
15. Key SOC metrics and KPIs: How to define and use them. Available at: https://www.techtarget.com/searchsecurity/tip/How-SOC-metrics-improve-security-operation-centers-performance.
16. *Seleznev V.M., Borovskaya O.E.* Vstraivanie instrumentov SOAR-platform v ekosistemu SOC dlya avtomatizatsii protsessa reagirovaniya na intsidenty IB [Embedding SOAR platform tools into the SOC ecosystem to automate the process of responding to information security incidents], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal], 2022, No. 10 (124). Available at: https://research-journal.org/archive/10-124-2022-october/10.23670/IRJ.2022.124.8. – DOI: 10.23670/IRJ.2022.124.8.
17. Running Local LLMs, CPU vs. GPU - a Quick Speed Test. Available at: https://dev.to/maximsaplin/running-local-llms-cpu-vs-gpu-a-quick-speed-test-2cjn.
18. CPU vs GPU for Running LLMs Locally. Available at: https://www.marktechpost.com/2024/03/23/cpu-vs-gpu-for-running-llms-locally/.
19. OWASP Top 10 for LLM Applications. Available at: https://owasp.org/www-project-top-10-for-large-language-model-applications/assets/PDF/OWASP-Top-10-for-LLMs-2023-v1_1.pdf.
20. *Bakhtin A.S.* Razrabotka metodiki integratsii bol'shikh yazykovykh modeley v protsessy tsentra monitoringa informatsionnoy bezopasnosti: diplomnaya rabota po spetsial'nosti 10.05.03 «Inf rmatsi nnaya bez pasn st' avt matizir vannykh sistem» [Development of a methodology for integrating large language models into the processes of the Information security Monitoring Center: thesis on specialty 05/10/03 "Information security of automated systems"]. Krasnodar: Kubanskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet, 2024, 93 p.

Частикова Вера Аркадьевна – Кубанский государственный технологический университет; e-mail: chastikova_va@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: 89184635536; кафедра кибербезопасности и защиты информации; к.т.н.; доцент.

Бахтин Антон Сергеевич – Кубанский государственный технологический университет; e-mail: bahtin_.anton@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: 8918 14989 ; кафедра кибербезопасности и защиты информации, студент.

Меркулов Павел Алексеевич – Кубанский государственный технологический университет; e-mail: merkulov.pashka444@gmail.com; г. Краснодар, Россия; тел.: 89182951 8; кафедра кибербезопасности и защиты информации; аспирант.

Chastikova Vera Arkadyevna – Kuban State Technological University; e-mail: chastikova_va@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79184635536; the Department of Cybersecurity and Information Protection; cand. of eng. sc.; associate professor.

Bahtin Anton Sergeevich – Kuban State Technological University; e-mail: bahtin_.anton@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79180149890; the Department of Cybersecurity and Information Protection; student.

Merkulov Pavel Alekseevich – Kuban State Technological University; e-mail: merkulov.pashka444@gmail.com; Krasnodar, Russia; phone: +79182951008; the Department of Cybersecurity and Information Protection; graduate student.

УДК 4. 32.2 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-70-79

А.Ю. Юрченко, М.Ю. Поленов

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ШТРИХКОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕЙ

Представлена распределённая программно-аппаратная система для автоматизированного распознавания штрихкодов на движущихся объектах в условиях производственной среды. Целью исследования является разработка надёжного и адаптивного решения, обеспечивающего устойчивое считывание штрихкодов вне зависимости от положения, скорости или высоты объектов, перемещающихся по транспортной ленте. Основной акцент сделан не на максимальной скорости обработки, а на обеспечении широкого угла обзора и надёжности распознавания при движении объектов. В отличие от традиционных сканеров, требующих точного позиционирования и дорогостоящего оборудования, предложенное решение базируется на использовании одной сетевой камеры и сервера с нейросетевыми модулями обработки. Это делает систему более универсальной и доступной для широкого круга предприятий. Ключевым элементом архитектуры выступает нейросетевой модуль восстановления изображений, основанный на модели MPRNet, способной устранять размытие и оптические искажения в кадрах видеопотока. После этапа предобработки изображения поступают в модуль детекции объектов, построенный на базе архитектуры YOLO, адаптированной под задачи распознавания штрихкодов. Распознанные данные сохраняются в базе с использованием ORM-интерфейса, что обеспечивает гибкую интеграцию в существующие информационные системы. Для предотвращения потери кадров и обеспечения высокой пропускной способности используется система асинхронной обработки с применением потоков и буферизованных очередей. Актуальность исследования обусловлена широкой распространённостью штрихкодов как основного средства промышленной маркировки и необходимостью автоматизации процессов учёта и отслеживания продукции в условиях гибкого производства. Несмотря на наличие решений в области сканирования и компьютерного зрения, большинство из них не рассчитаны на работу с нестабильным или низкокачественным видеопотоком. Предложенная система демонстрирует устойчивость к ряду искажений и может быть реализована на бюджетном оборудовании, что открывает перспективы для её применения в промышленности, логистике и складском хозяйстве.

Штрихкод; распознавание образов; компьютерное зрение; нейросеть; распределенная система.

A.Yu. Yurchenko, M.Yu. Polenov

DISTRIBUTED SYSTEM FOR BARCODE RECOGNITION USING NEURAL NETWORKS

This work presents a distributed software-hardware system for automated barcode recognition on moving objects in industrial environments. The primary objective of the research is to develop a reliable and adaptive solution capable of consistently reading barcodes regardless of the orientation, speed, or height of objects moving along a conveyor belt. The main focus is not on achieving maximum processing speed, but rather on providing a wide field of view and ensuring reliable recognition of moving objects. Unlike traditional scanners that require precise positioning and expensive hardware, the proposed approach leverages a single network camera and a server equipped with neural processing modules, providing a cost-effective and versatile alternative suitable for a wide range of industrial applications. A key component of the system architecture is a neural image restoration module based on the MPRNet model, which effectively reduces motion blur and optical distortions in video frames. After preprocessing, frames are passed to an object detection module built upon the YOLO architecture, which has been adapted specifically for barcode recognition. Detected barcode data is stored in a database using an ORM interface, enabling seamless integration with existing enterprise systems. To prevent frame loss and maintain high throughput, the system incorporates asynchronous processing mechanisms using multithreading and buffered queues. The relevance of this research stems from the widespread use of barcodes as the primary method of product marking in industrial settings and the increasing demand for automation in product tracking and inventory control. Despite the availability of various vision-based and scanning solutions, most existing systems are not designed to handle unstable or low-quality video streams. The proposed system demonstrates robustness to visual distortions and motion-related artifacts, making it suitable for deployment in real production environments. Its affordability and adaptability also open up possibilities for implementation in logistics, warehousing, and supply chain management.

Barcode; image recognition; computer vision; neural network; distributed system.

Введение. Штрихкоды остаются одним из наиболее универсальных и надёжных средств маркировки продукции в современной промышленности [1]. Они широко применяются для идентификации, отслеживания и учёта товаров на производственных линиях, складах и в логистических цепочках. Доступность технологии и высокая скорость считывания делают её привлекательной для большинства предприятий. Однако классические методы считывания, основанные на лазерных сканерах, сталкиваются с рядом ограничений: они требуют точной ориентации объектов, неэффективны при перемещении по широким конвейерным лентам, а также чувствительны к оптическим искажениям и смазанности изображения, возникающим при движении объектов.

Развитие технологий компьютерного зрения и глубокого обучения открыло новые возможности для замены традиционных сканеров программными решениями, способными обрабатывать видеопоток и выявлять маркировку в реальном времени. Существующие решения предлагают методы распознавания штрихкодов на статичных изображениях с применением библиотек для декодирования и классических фильтров. Однако при переходе к видео, особенно в условиях перемещающихся объектов, большинство существующих решений оказываются малоприменимыми: они не способны обрабатывать смазанные кадры, не адаптируются к изменяющимся ракурсам и требуют стабильного видеопотока.

Настоящая работа направлена на разработку гибкой и устойчивой к внешним факторам системы распознавания штрихкодов в режиме реального времени. Предлагаемый подход отличается интеграцией современных нейросетевых моделей и архитектур асинхронной обработки, что позволяет добиваться надёжности и качества даже при использовании недорогого оборудования.

Научная новизна заключается в объединении нейросетевого восстановления изображений, высокоэффективной детекции объектов и модулей асинхронной передачи и хранения данных в распределённой системе. В отличие от решений, ориентированных исключительно на скорость, данная разработка делает упор на устойчивость и полноту обработки. В перспективе такое решение может быть реализовано как компактное устройство, способное заменить несколько сканеров одной камерой и сервером обработки.

Постановка задачи. Процесс автоматического считывания штрихкодов на производстве требует высокой надёжности при обработке большого потока продукции с разными параметрами движения. Стационарные сканеры с фиксированным фокусом и ограниченным углом обзора оказываются неэффективными в ситуациях, где объекты перемещаются с различной ориентацией, скоростью или высотой. Помимо этого, такие решения требуют дорогостоящего оборудования и точной настройки, что ограничивает их применимость в гибких производственных системах.

Разработка программной системы на основе методов компьютерного зрения и нейросетей, способной выполнять считывание маркировки с видеопотока, имеет высокую прикладную значимость. Она позволяет автоматизировать учёт и контроль продукции, снизить стоимость оборудования, а также повысить точность идентификации за счёт интеллектуальной обработки изображений. Системы такого рода востребованы не только в промышленности, но и в логистике, складском учёте, торговле. Адаптируемость решения и независимость от дорогой аппаратной базы делают его перспективным для масштабного внедрения.

В последние годы большое внимание уделяется применению сверточных нейросетей для анализа изображений в реальном времени [2]. Архитектура YOLO (Y u On y Look Once) [3, 4], показала высокую эффективность в задачах детекции объектов. В то же время проблема устранения смазанности изображений рассматривается в контексте моделей восстановления, таких как MPRNet [5, 6]. Однако интеграция этих моделей в промышленную систему реального времени до сих пор требует исследований, особенно при работе на бюджетном оборудовании и с нестабильным видеопотоком.

Таким образом ставится задача – разработать программно-аппаратную систему для автоматизированного распознавания и декодирования штрихкодов на видеопотоке с движущихся объектов в условиях производственной среды. Система должна обеспечи-

вать устойчивую работу в режиме реального времени, используя современные методы компьютерного зрения и нейросетевые подходы, при этом оставаться доступной по стоимости и легко масштабируемой.

Достижение этой цели позволит заменить дорогое специализированное оборудование универсальной цифровой системой, повысить надёжность и точность считывания в сложных условиях, создать основу для адаптации решения под различные производственные сценарии.

Задачи исследования. Основными задачами являются:

1) анализ существующих методов детекции и декодирования штрихкодов;
2) организация захвата видеопотока с камеры и разбиение его на отдельные кадры;
3) реализация асинхронной архитектуры обработки с применением потоков и очередей;
4) внедрение нейросетевой модели восстановления изображения (MPRNet) для устранения их смазанности;
5) интеграция алгоритма YOLO для точного выявления области штрихкода;
6) реализация процедуры вырезки и декодирования штрихкодов с использованием специализированных библиотек;
7) реализация инструментов мониторинга системы и фильтрации входных данных по заданным критериям.

Объект исследования – процесс считывания штрихкодов в производственной среде.

Предмет исследования – методы видеопотоковой обработки изображений, нейросетевые модели восстановления качества и алгоритмы детекции и декодирования штрихкодов.

Если применить асинхронную архитектуру обработки, дополненную нейросетевыми алгоритмами устранения смазанности и объектной детекции, то можно получить устойчивую и адаптивную систему считывания штрихкодов, способную эффективно работать в условиях нестабильного видеопотока, при низкой стоимости оборудования и высокой вариативности производственной среды.

Обзор подходов. Обнаружение и распознавание штрихкодов в видеопотоке представляет собой задачу, лежащую на пересечении компьютерного зрения и обработки изображений. Существуют два основных подхода: классические алгоритмы обработки изображений (например, Canny, H u h, морфология) и современные методы, основанные на глубоком обучении (YOLO, SSD, Faster R-CNN, Detectr n и др.) [7]. Классические алгоритмы, такие как детектор границ Canny в сочетании с преобразованием Хафа, демонстрируют приемлемые результаты при наличии чётких, контрастных изображений. Однако в условиях производственной среды, где присутствует шум, нестабильное освещение, движения объектов и фоны с текстурами, такие методы проявляют серьёзные ограничения: высокая чувствительность к шуму и артефактам съёмки, особенно на видеопотоке с низким bitrate, невозможность адаптации к различным типам и ориентациям штрихкодов – в частности, перспективные искажения, наклоны или частичное перекрытие делают традиционные методы малоэффективными, ограниченная масштабируемость – адаптация таких алгоритмов под разные условия требует ручной настройки параметров (порогов, размеров ядер и т.д.), что трудно реализуемо в универсальной системе.

Современные модели глубокого обучения были исследованы в рамках задачи локализации штрихкодов на кадрах. Рассматривались и тестировались следующие архитектуры:

SSD (Single Shot Detector) – модель работает быстро, но в реальных экспериментах показала худшую производительность на мелких объектах (штрихкоды часто занимают небольшую часть кадра), особенно при сжатии и низкой резкости;

Faster R-CNN – демонстрирует высокую точность, но её скорость существенно уступает другим моделям. Для задач в реальном времени, особенно с дешёвым оборудованием, использование этой модели делает систему инертной и перегруженной по ресурсам;

Detectron2 от Facebook AI – мощный фреймворк с поддержкой множества детекторов и сегментаторов. Однако для задачи распознавания штрихкодов он оказался избыточным, а его интеграция потребовала бы значительных затрат на настройку и обучение под специфичные датасеты.

В данном исследовании по итогам сравнения для локализации используется глубокая нейросетевая модель YOLOv8, она имеет оптимальный баланс между точностью и скоростью, особенно при работе на GPU, поддерживает работу с малыми объектами благодаря улучшенной архитектуре, обладает высокой устойчивостью к разным масштабам и ориентациям объектов, легко интегрируется и обучается на пользовательских датасетах, что позволило адаптировать модель под конкретные условия съёмки (например, наклон или размытие).

Для декодирования используются библиотеки на Python (pyzbar, zxing-cpp), но традиционные декодеры без предварительной нейросетевой обработки хорошо работают только на чётких изображениях и сильно теряют точность при наличии смазанности, вызванной движением или нестабильной фокусировкой. Для сложных условий съёмки требуется предобработка изображения, которую традиционные декодеры не выполняют автоматически.

В этой связи было принято решение об интеграции нейросетевой модели восстановления качества изображений MPRNet, которая используется только в случае неудачи при первичной попытке декодирования. Это позволяет существенно повысить устойчивость и полноту распознавания, особенно на смазанных или зашумлённых кадрах.

Также были протестированы и другие модели восстановления, в том числе SwinIR [8], однако они показали либо избыточное время инференса, либо более низкое качество восстановления при наличии сложных искажений. В отличие от них, MPRNet использует многоуровневую стратегию восстановления и демонстрирует стабильную работу на широком спектре реальных искажающих факторов.

Таким образом, выбранный гибридный подход – использование YOLOv8 для локализации, классических декодеров с фильтрацией, и нейросетевого восстановления качества при необходимости – обеспечивает высокую адаптивность, точность и устойчивость всей системы в реальных производственных условиях.

Выбор стратегии. Была выбрана экспериментальная стратегия исследования, направленная на разработку, реализацию и тестирование многоэтапной архитектуры для надежного распознавания штрихкодов в видеопотоке. Эксперименты проводились на заранее записанных видеороликах с различными условиями съёмки (освещение, движение, шум), а результаты сравнивались по критериям точности и скорости.

Разработка архитектуры. Разработка основывалась на следующих архитектурных принципах.

Модульность: каждый этап обработки (захват, детекция, декодирование, улучшение качества) выделен в отдельный поток.

Масштабируемость: архитектура использует очереди (Queue) и потоки (Thread), что позволяет масштабировать обработку видеопотока.

Отказоустойчивость: при неудачной декодировке изображение повторно обрабатывается с применением модели повышения качества.

Логирование и мониторинг: реализован сбор системной статистики (FPS, RAM, GPU).

Компоненты системы. На объекте размещается промышленная IP-камера, обеспечивающая постоянный видеопоток с высоким разрешением (например, 4K). Камера может передавать видеопоток в реальном времени по сети (RTSP или аналогичный протокол) или периодически сохранять видеофайлы на промежуточный накопитель.

На стороне сервера располагается основная логика системы. Сервер принимает видеопоток с камеры и обрабатывает его покадрово. Вся обработка реализована в виде набора параллельных потоков, работающих независимо, что обеспечивает высокую пропускную способность и устойчивость к нагрузке.

Распознанные и прошедшие проверку штрихкоды передаются в централизованную базу данных. Каждая запись сопровождается временной меткой (timestamp), отражающей время захвата соответствующего кадра. Это обеспечивает трассировку и хронологию операций. Вся система работает в отдельной виртуальной сети VLAN для безопасности данных [9]. Передача в БД реализована через отдельный интерфейс.

Таким образом, вся система физически состоит из трех компонентов: камеры, установленной в производственном помещении, сервера обработки данных, выполняющего весь цикл анализа и распознавания, и sq -сервера, где хранятся полученные результаты. Структура распределенной системы приведена на рис. 1.

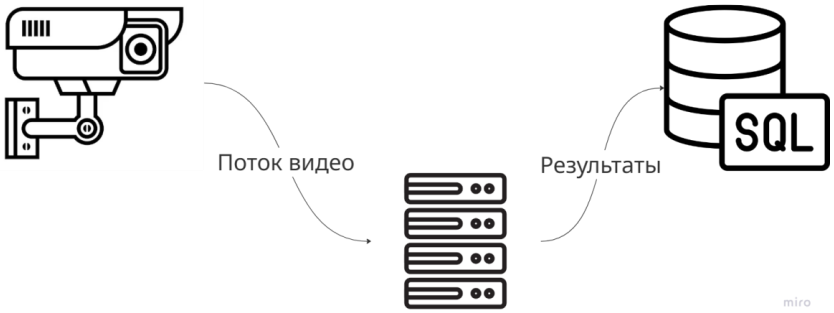


Рис. 1. Структура распределенной системы

Система на сервере состоит из следующих компонентов:

1) модуль захвата кадров: извлекает кадры из видео и помещает их в очередь;
2) YOLO-модуль: локализует предполагаемые участки со штрихкодами;
3) модуль обрезки: извлекает детектированные регионы;
4) декодер: пытается расшифровать штрихкод с помощью pyzbar и zxin -cpp;
5) модуль MPRNet: восстанавливает изображение при неудаче;
6) Up ader: отправка результата в базу данных P st reSQL;
7) SystemM nit r: фиксирует показатели производительности и успешные распознавания.

Интерфейсы и протоколы. Взаимодействие между модулями реализовано через очереди Pyth n Queue, что обеспечивает потокобезопасную передачу данных. Для хранения распознанных кодов используется P st reSQL, подключение осуществляется через SQLAlchemy [10].

Методы и алгоритмы решения задачи. Рассмотрим основные методы и модели.

YOLOv8: нейросетевая модель используется для локализации штрихкодов. Выбрана за высокую точность и скорость. Входными данными для системы могут являться отдельные изображения, видео файлы, а также видео поток. Выходными данными являются информация о обнаруженных на изображениях объектах (их класс, расположение и другие данные, в зависимости от режима работы и типа модели). Данная информация может быть автоматически наложена на исходное изображение и сохранена/выведена в отдельный файл. YOLOv8 может использовать как CPU, так и GPU.

Pyzbar + ZXing-cpp: комбинация декодеров повышает устойчивость к различным типам штрихкодов. При объединении работы двух библиотек увеличивается количество распознанных объектов и при этом уменьшается общее время работы в сравнении с более сильной библиотекой

MPRNet: модель восстановления изображений, используется при неудаче начального декодирования. MPRNet была выбрана как одна из наиболее эффективных и универсальных архитектур глубокого обучения в задаче ima e rest rati n [12]. Она демонстрирует высокую точность восстановления при наличии как глобального размытия (например, вызванного движением камеры), так и локальных искажений. Модель построена на многоступенчатом подходе, при котором изображение обрабатывается на трёх уровнях: от грубого до детального восстановления (рис. 2). Это позволяет достигать более точных результатов по сравнению с одноуровневыми архитектурами. Дополнительным преимуществом является модульность MPRNet – её можно легко адаптировать под конкретные задачи, такие как

деблюринг, денойзинг, реставрация JPEG-артефактов, что делает её особенно удобной в составе гибкой системы обработки видеоданных. В нашей работе использована модель MPRNet для решения задачи deb urrin , обученная на датасете GoPro.

Рис. 2. Сравнение изображений до и после восстановления нейросетью MPRNet

Фильтрация по шаблону: применён регулярный шаблон для фильтрации ложноположительных распознаваний. В ситуации, когда известен формат штрихкодов, которые должны декодироваться, это средство повышает точность работы и отсекает ненужные данные.

Методы предобработки изображений (OpenCV). Для повышения качества входных изображений перед попыткой декодирования штрихкодов применялись методы предобработки с использованием библиотеки OpenCV [13, 14]. Эти методы использовались как до подачи изображения в модель MPRNet, так и как самостоятельный этап в некоторых случаях. Основные использованные в системе приёмы [15]:

- преобразование в градации серого – уменьшает количество информации и повышает контрастность важных объектов;
- гауссово размытие (Gaussian Blur) – уменьшает шум, который может мешать декодированию;
- адаптивная бинаризация – помогает выделить штрихкод в условиях переменного освещения.

Морфологические операции (расширение/эрозия) использовались в отдельных случаях для устранения мелких шумов или соединения разорванных линий.

Фильтрация шумов (Non-local Means, Bilateral Filter) – проверялась экспериментально, но оказалась менее эффективной, чем вышеуказанные методы [16].

В результате предобработки изображения становились более пригодными для декодирования, особенно в случаях сильного шума или низкого контраста. Конкретный алгоритм восстановления изображений в системе выбирается в зависимости от характера повреждений или искажений в изображении, доступного времени и доступных ресурсов для вычислений [17].

Алгоритм обработки и программная реализация. Алгоритм состоит из следующих основных этапов:

1. Захват кадра → YOLO → обрезка → попытка декодирования.
2. Если неудача, то:
   - улучшение изображения через MPRNet;
   - повторная попытка декодирования.
3. Если успех – сохранить штрихкод, метку времени, изображение.

Все эти действия происходят асинхронно и последовательно [18, 19]. На рис. 3 представлена схема обработки кадра и передачи между очередями и потоками.

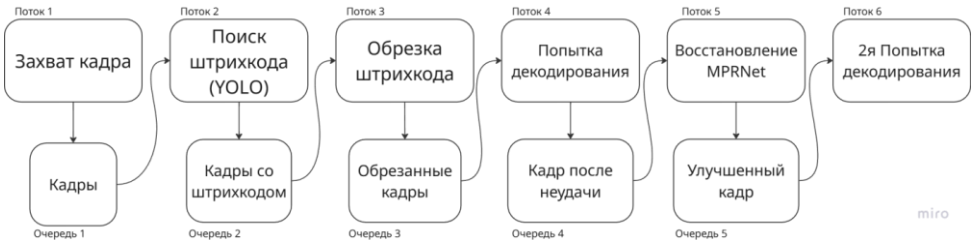


Рис. 3. Взаимодействие потоков и очередей

Программное приложение содержит 6 независимых потоков и 5 очередей. Сервер получает видео, в первом потоке разбивает на кадры и каждый кадр помещает в очередь, это необходимо для того, чтобы при простое на более долгих операциях кадры не терялись, а просто хранились в этой очереди, обрабатываясь в возможном темпе. Во втором потоке работает нейросеть детектирования YOLO, которая обучена на нахождение штрихкодов. Она возвращает координаты объекта. В очередь передается кадр, координаты объекта, временная метка (здесь она будет самой точной). В третьем потоке происходит обрезка по координатам с паддингом 1 . Локализированная область передается в третью очередь вместе с той же временной меткой. В четвертом потоке происходит попытка декодирования с помощью двух библиотек ZXin (в обертке ZXin -cpp) и Zbar (в обертке PyZbar), если первая, более быстрая, не справляется, происходит попытка распознания более долгой, но точной PyZbar. Если распознавание прошло удачно – сохраняются результаты, если нет, то кадр передается в четвертую очередь. В пятом потоке кадр отправляется для обработки нейросети MPRNet, обученной восстанавливать смазанные снимки, так как кадры камера получает в динамике (высока вероятность, что кадр просто смазан). После восстановления кадр передается в пятую очередь и в шестом потоке происходит аналогичная попытка распознавания. При успешном распознавании кадр сохраняется с разметкой, а данные отправляются на сервер.

Анализ данных. Данные логировались с помощью SystemM nit r [2]: количество кадров, число распознанных кодов, загрузка системы. Также сохранялись изображения с распознанными кодами и временной меткой для последующего анализа.

В результате работы каждый успешный кадр сохраняется, все уникальные штрихкоды записываются. Пример сохраненного кадра представлен на рис. 4.

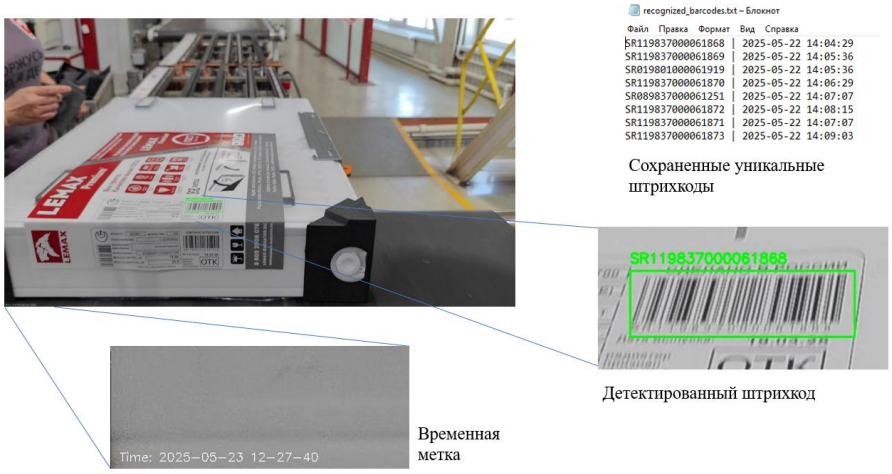


Рис. 4. Экспериментальные результаты

Трудности и ограничения, выявленные в процессе реализации. В ходе практической реализации системы автоматизированного распознавания штрихкодов в видеопотоке были выявлен ряд технических сложностей, связанных как с производительностью оборудования, так и с особенностями работы алгоритмов.

Высокая нагрузка на графические ресурсы при использовании MPRNet. Модель восстановления изображений MPRNet, несмотря на свою эффективность, обладает высокой вычислительной сложностью. При запуске на слабом или интегрированном GPU время обработки одного кадра значительно возрастает (до 1-2 секунд), что неприемлемо для систем, ориентированных на реальное время. Особенно ощутима эта задержка при параллельной обработке нескольких потоков или при масштабировании на слабых серверах. Для повышения скорости на этапе восстановления тестировалась облегчённая модификация MPRNet с урезанными слоями, что позволило снизить время инференса примерно на 4 % без критичной потери качества. Также применялось ограничение количества кадров, отправляемых на восстановление, с помощью предфильтра на входе.

Проблемы при работе в условиях недостаточного освещения. В ночное время или при съёмке в неосвещённых участках производственной линии качество видеопотока резко падает: появляются шумы, контрастность снижается, возникают артефакты сжатия. В таких условиях детекторы работают нестабильно, а декодирование часто не удаётся даже после применения MPRNet. Рекомендовано использование внешней инфракрасной или светодиодной подсветки, а также предварительная фильтрация кадров с низкой освещённостью на стадии захвата. Также тестировались методы адаптивного выравнивания контраста и шумоподавления средствами OpenCV до подачи изображения в нейросеть.

Заключение. В ходе работы была разработана система для автоматизированного обнаружения и распознавания штрихкодов из сохраненных видео или из видеопотока в реальном времени. В качестве основы для детектирования использована модель YOLOv8, продемонстрировавшая высокую скорость и точность локализации штрихкодов на отдельных кадрах. Распознавание содержимого осуществлялось с использованием выбранных библиотек, в том числе с предварительной обработкой изображений, включающей масштабирование, повышение резкости и восстановление качества с помощью нейросетевой модели MPRNet.

Предложена многоступенчатая архитектура обработки видеопотока с применением MPRNet для повышения точности распознавания. Разработан механизм повторного декодирования после восстановления изображения. Сочетание YOLOv8, MPRNet и двойного декодера (pyzbar и zxin -cpp) впервые применено совместно для данной задачи.

Практическая значимость предложенного подхода заключается в том, что при последующей адаптации и доработке метод может применяться в логистике (автоматическое сканирование упаковок), производстве (слежение за продукцией), видеонаблюдении (инвентаризация), ритейле (анализ видеозаписей кассовой зоны). Полученная система устойчива к помехам, размытию и низкому освещению.

Таким образом, предложенные подход и алгоритм объединяют высокую точность, эффективность с точки зрения вычислительных ресурсов и хорошую масштабируемость. Рассмотренное решение обладает высокой практической значимостью и может быть внедрено в промышленное производство, торговые предприятия, а также использовано в системах мониторинга и контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Арсланова Л.С.* Использование штрихового кодирования // Экономика и социум. – 2016. – № 2 (21). – С. 42-44.
2. *Tan M., Pang R., Le Q.V.* EfficientDet: Scalable and Efficient Object Detection // arXiv. – 2020. – arXiv:1911.09070v7 [cs.CV].
3. *Бурень М.Н.* Обзор возможностей YOLO v8 в рамках решения задачи распознавания изображений // Компьютерные системы и сети: Сб. статей 6 -й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, БГУИР. – Минск: БГУИР, 2 24. – С. 28-33.
4. *Hansen D.K., Nasrollahi K., Rasmussen C.B., Moeslund T.B.* Real-Time Barcode Detection and Classification Using Deep Learning // Proceedings of the 9th International Joint Conference on Computational Intelligence (IJCCI 2017). Vol. 1. – SciTePress, 2017. – P. 321-327. – DOI: 10.5220/0006508203210327.

5. *Abuolaim A. et al.* NTIRE 2021 Challenge for Defocus Deblurring Using Dual-pixel Images: Methods and Results // CVPRW. – 2021. – P. 578-587. – DOI: 10.1109/CVPRW53098.2021.00070.
6. *Nah S. et al.* NTIRE 2021 Challenge on Image Deblurring // CVPRW. – 2021. – P. 149-165. – DOI: 10.1109/CVPRW53098.2021.00025.
7. *Ren S., He K., Girshick R., Sun J.* Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks // arXiv. – 2016. – arXiv:1506.01497v3 [cs.CV].
8. *Liang J., Cao J., Sun G., Zhang K., Van Gool L., Timofte R.* SwinIR: Image Restoration Using Swin Transformer // arXiv. – 2021. – arXiv:2108.10257v1 [eess.IV].
9. *Стрельцов Д.С., Бутенко Е.А.* Vlan id enumeration. Методы защиты // Мировая наука. – 2024. – № 12 (93). – С. 120-133.
10. *Неустроев А.В.* Сохранить JSON данные в базу данных sq a chemy // Проблемы науки. – 2016. – № 12 (13).
11. *Zhao T., Ma X., Li X., Zhang C.* MPR-Net: Multi-Scale Pattern Reproduction Guided Universality Time Series Interpretable Forecasting // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2023. – arXiv:2307.06736.
12. *Chen X., Li Z., Pu Y., Liu Y., Zhou J., Qiao Y., Dong Ch.* A Comparative Study of Image Restoration Networks for General Backbone Network Design // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2024. – P. 74-91.
13. *Буэно Г.Г., Суарес О.Д., Эспиноса А. и др.* Обработка изображений с помощью OpenCV: пер. с англ. Слинкин А.А. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 210 с.
14. *Boracchi G., Foi A.* Modeling the Performance of Image Restoration from Motion Blur // IEEE Transactions on Image Processing. – 2012. – Vol. 21, Iss. 8. – P. 3502-3517. – DOI: 10.1109/TIP.2012.2192126.
15. *Вербицкая В.И., Коршикова Д.В., Купчина Е.В*. Реализация алгоритма восстановления «Фильтр Винера» на Pyth n // Информационные технологии и управление: Матер. 60-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, 2 24. – Минск: БГУИР, 2 24. – С. 69.
16. *Иващенко В.Ю.* Восстановление изображений и различные техники реставрации используемые в сфере обработки визуальных цифровых ресурсов // Теория и практика современной науки. – 2019. – № 12 (54). – С. 143-147.
17. *Коршикова Д.В., Кукин Д.П., Купчина Е.В.* Алгоритмы восстановления изображений // Информационные технологии и системы 2 23 (ИТС 2 23): Матер. Международной научной конференции. – Минск: БГУИР, 2 23. – С. 149-150.
18. *Абакаров Г.М.* Анализ и оценка многопоточности для эффективности приложений // Вестник науки. – 2023. – № 12 (69). – С. 1 94-1098.
19. *Кадомский А.А., Захаров В.А.* Эффективность многопоточных приложений // Научный журнал. – 2016. – № 7 (8).
20. *Злобина Н.В., Волжанкин Н.В., Пособилов Н.Е.* Обеспечение централизованного мониторинга для систем сложной архитектуры с большим объёмом данных // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 4 (119). – С. 18-23.

REFERENCES

1. *Arslanova L.S.* Ispol'zovanie shtrikhovogo kodirovaniya [Use of barcode coding], *Ekonomika i sotsium* [Economics and Society], 2016, No. 2 (21), pp. 42-44.
2. *Tan M., Pang R., Le Q.V*. EfficientDet: Scalable and Efficient Object Detection, *arXiv,* 2020. arXiv:1911.09070v7 [cs.CV].
3. *Buren' M.N*. Obzor vozmozhnostey YOLO v8 v ramkakh resheniya zadachi raspoznavaniya izobrazheniy [Review of YOLO v8 capabilities for image recognition tasks], *Komp'yuternye sistemy i seti: Sb. statey 60-y nauchnoy konferentsii aspirantov, magistrantov i studentov, BGUIR* [60th Anniversary Scientific Conference of Postgraduates, Master's Students and Students of BSUIR]. Minsk: BGUIR, 2024, pp. 28-33.
4. *Hansen D.K., Nasrollahi K., Rasmussen C.B., Moeslund T.B.* Real-Time Barcode Detection and Classification Using Deep Learning, *Proceedings of the 9th International Joint Conference on Computational Intelligence (IJCCI 2017).* Vol. 1. SciTePress, 2017, pp. 321-327. DOI: 10.5220/0006508203210327.
5. *Abuolaim A. et al.* NTIRE 2021 Challenge for Defocus Deblurring Using Dual-pixel Images: Methods and Results, *CVPRW*, 2021, pp. 578-587. DOI: 10.1109/CVPRW53098.2021.00070.
6. *Nah S. et al.* NTIRE 2021 Challenge on Image Deblurring, *CVPRW*, 2021, pp. 149-165. DOI: 10.1109/CVPRW53098.2021.00025.
7. *Ren S., He K., Girshick R., Sun J.* Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks, *arXiv,* 2016. arXiv:1506.01497v3 [cs.CV].

8. *Liang J., Cao J., Sun G., Zhang K., Van Gool L., Timofte R.* SwinIR: Image Restoration Using Swin Transformer, *arXiv*, 2021. arXiv:2108.10257v1 [eess.IV].
9. *Strel'tsov D.S., Butenko E.A.* Vlan id enumeration. Metody zashchity [VLAN ID enumeration: security methods], *Mirovaya nauka* [World Science], 2024, No. 12 (93), pp. 120-133.
10. *Neustroev A.V.* Sokhranit' JSON dannye v bazu dannykh sqlalchemy [Saving JSON data to a database with SQLAlchemy], *Problemy nauki* [Problems of Science], 2016, No. 12 (13).
11. *Zhao T., Ma X., Li X., Zhang C.* MPR-Net: Multi-Scale Pattern Reproduction Guided Universality Time Series Interpretable Forecasting, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence,* 2023. arXiv:2307.06736.
12. *Chen X., Li Z., Pu Y., Liu Y., Zhou J., Qiao Y., Dong Ch.* A Comparative Study of Image Restoration Networks for General Backbone Network Design, *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),* 2024, pp. 74-91.
13. *Bueno G.G., Suares O.D., Espinosa A. i dr.* Obrabotka izobrazheniy s pomoshch'yu OpenCV [Image Processing with OpenCV]: transl. from engl. Slinkin A.A. Moscow: DMK Press, 2016, 210 p.
14. *Boracchi G., Foi A.* Modeling the Performance of Image Restoration from Motion Blur, *IEEE Transactions on Image Processing,* 2012, Vol. 21, Iss. 8. – P.3502-3517. DOI: 10.1109/TIP.2012.2192126.
15. *Verbitskaya V.I., Korshikova D.V., Kupchina E.V.* Rea izatsiya a ritma v sstan v eniya «Fi 'tr Vinera» na Python [Implementation of the Wiener Filter image restoration algorithm in Python], *Informatsionnye tekhnologii i upravlenie: Mater. 60-oy nauchnoy konferentsii aspirantov, magistrantov i studentov, 2024* [Information Technologies and Control: Proceedings of the 60th Scientific Conference of Postgraduates, Master's Students and Students, 2024]. Minsk: BGUIR, 2024, pp. 69.
16. *Ivashchenko V.Yu.* Vosstanovlenie izobrazheniy i razlichnye tekhniki restavratsii ispol'zuemye v sfere obrabotki vizual'nykh tsifrovykh resursov [Image restoration and restoration techniques used in visual digital resource processing], *Teoriya i praktika sovremennoy nauki* [*Theory and Practice of Modern Scienc*e], 2019, No. 12 (54), pp. 143-147.
17. *Korshikova D.V., Kukin D.P., Kupchina E.V.* Algoritmy vosstanovleniya izobrazheniy [Image restoration algorithms]. *Informatsionnye tekhnologii i sistemy 2023 (ITS 2023): Mater. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Information Technologies and Systems 2023 (ITS 2023): Proceedings of the International Scientific Conference]. Minsk: BGUIR, 2023, pp. 149-150.
18. *Abakarov G.M.* Analiz i otsenka mnogopotochnosti dlya effektivnosti prilozheniy [Analysis and Evaluation of Multithreading for Application Efficiency], *Vestnik nauki* [Science Bulletin], 2023, No. 12 (69), pp. 1094-1098.
19. *Kadomskiy A.A., Zakharov V.A.* Effektivnost' mnogopotochnykh prilozheniy [Efficiency of *Multithreaded Applications*], *Nauchnyy zhurnal* [Scientific Journal], 2016, No. 7 (8).
20. *Zlobina N.V., Volzhankin N.V., Posobilov N.E.* Obespechenie tsentralizovannogo monitoringa dlya sistem slozhnoy arkhitektury s bol'shim ob"emom dannykh [Ensuring centralized monitoring for complex architecture systems with large data volumes], *Tr. NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of NSTU nam. R.E. Alekseev], 2017, No. 4 (119), pp. 18-23.

Юрченко Анастасия Юрьевна – Южный федеральный университет, e-mail: iurchen@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 891856 9741, кафедра вычислительной техники; студент.

Поленов Максим Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: mypolenov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Yurchenko Anastasiya Yuryevna – Southern Federal University; e-mail: iurchen@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185609741; the Department of Computer Engineering; student.

Polenov Maxim Yuryevich – Southern Federal University; e-mail: mypolenov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371656; the Department of Computer Engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.056.53 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-80-91

А.С. Жук

ПРИМЕНЕНИЕ РЮКЗАЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ МЕЖДУ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ НСД

Рассматривается задача проектирования безопасной системы защиты от НСД. В частности анализируются иерархические системы защиты данных с криптографическим распределением ключей, а именно задача организации доступа к файловым хранилищам. Несмотря на то, что криптографическое распределение ключей позволяет обеспечить безопасность информации от пользователей, не имеющих к ней доступ, иерархическая система управления доступом изначально не предназначена для решения задачи защиты информации от недобросовестных действий самого пользователя. Таким образом целью исследования является совершенствование иерархической системы защиты от НСД с криптографическим распределением ключей сверху-вниз для предотвращения несанкционированного обмена информацией между пользователями различного уровня доступа. Для достижения поставленной цели автором ранее было предложено использовать задачи Диофантового анализа, в частности задачи о рюкзаке. На основании требований, предъявляемых к иерархическим системам с криптографическим распределением ключей в своих работах автор сформулировал требования к рюкзачному вектору для возможности его применения, а также сформулировал и доказал условия, при которых эти требования будут выполнятся, в частности, условия инъективности мультипликативного рюкзачного вектора и условия сохранения сложности задачи о мультипликативном рюкзаке. В данной статье разработан рекурсивный алгоритм построения рюкзачного вектора, удовлетворяющего этим условиям. Показано, что мультипликативные рюкзачные векторы, удовлетворяющие общеизвестным достаточным критериям инъективности являются частным случаем рюкзачного вектора, построенного с помощью разработанного алгоритма. Проведен анализ известных алгоритмов построения инъективных рюкзачных векторов как для мультипликативного, так и для аддитивного случая, и показано, что существующие алгоритмы построения рюкзачных векторов можно применять, как составные части разработанного алгоритма. Далее автор показывает применение разработанного алгоритма для совершенствования иерархической системы защиты от НСД с криптографическим распределением ключей сверху-вниз.

Модель защиты от несанкционированного доступа; иерархическая система защиты; криптографическое распределение ключей; задача о рюкзаке; мультипликативный рюкзачный вектор; инъективность рюкзачного вектора.

A.S. Zhuck

APPLICATION OF BACKPACK ALGORITHMS TO PREVENT UNAUTHORIZED EXCHANGE OF INFORMATION BETWEEN DIFFERENT LEVELS USERS IN THE HIERARCHICAL SYSTEM OF PROTECTION AGAINST UNAUTHORIZED ACCESS

The problem of designing a secure system of protection against unauthorized access is considered. In particular, this article considers hierarchical data protection systems with cryptographic key distribution, namely, the problem of organizing access to file storages is considered. Although cryptographic key distribution can ensure the security of information from users who do not have access to it, the hierarchical access control system was not originally designed to solve the problem of protecting information from the dishonest actions of the user himself. Thus, the overall objective of the study is to prevent unauthorized exchange of information between users of different levels of a hierarchical system of protection against unauthorized access with cryptographic key distribution. To achieve the stated goal, the authors previously proposed to use the problems of Diophantine analysis, in particular the knapsack problem. Previously, the authors formulated the properties of the knapsack vector, applicable for improving the hierarchical system of protection against unauthorized access. In this article, the authors present the conditions for the injectivity of knapsack vectors. A comparative analysis of these conditions with the already established injectivity conditions is carried out. The analysis shows the need to formulate such conditions and the applicability of knapsack vectors that satisfy them for improving the hierarchical model of protection against unauthorized access. Based on the specified conditions, this article develops a recursive algo-

rithm for constructing an injective multiplicative knapsack vector. The authors then analyze the possibility of its application for modeling a hierarchical mandatory model of information protection from unauthorized access. The analysis shows how already known algorithms for constructing knapsack vectors can be used as part of the developed algorithm. The authors also show where exactly in the developed system it is necessary to apply this algorithm to implement the properties required for hierarchical systems of protection against unauthorized access.

Access control problem; hierarchical security system; cryptographic key distribution; knapsack problem; multiplicative knapsack vector; multiplicative knapsack injectivity.

Введение. В распределенных информационных системах с выделенным файловым хранилищем основной проблемой информационной безопасности является реализация защиты данных от несанкционированного доступа. В рамках решения этой проблемы рассматриваются модели защиты от несанкционированного доступа (НСД) к иерархическим данным с криптографическим распределением ключей. Примерами основных алгоритмов распределения ключей, применяемыми в данных системах, являются, например, алгоритм J.Yeh, алгоритм хэш-функций, Hwang алгоритм [1–3].

Основной подход для построения таких систем строится на том утверждении, что пользователь с более высоким уровнем иерархии имеет доступ к информации своих потомков [1], в то время как доступ в обратном направлении не возможен. Безопасность подобных систем строится на безопасности применяемых криптоалгоритмов. Но при этом такой подход абсолютно не предусматривает защиту от нерегламентированных действий самих пользователей с высоким уровнем полномочий. В частности, в системах с криптографическим распределением ключей технически возможен несанкционированный информационный поток от родителя к потомку [2, 4]. В [5] приведена модель такого информационного потока и формализована математическая постановка задачи совершенствования данной системы в целях предотвращения несанкционированного обмена информацией между пользователями различного уровня иерархии. Отметим, что подобная задача решена в большинстве современных мандатных моделей контроля доступа [6–8]. Тем не менее, в иерархических системах с криптографическим распределением ключей данная проблема остается актуальной.

Так как рассматриваемые модели предполагают использование числовых идентификаторов всех предков данного субъекта доступа для определения возможности доступа субъекта к объекту, автор предположил, что подобную схему возможно моделировать с использованием задачи о рюкзаке [9]. На основании требований к системам защиты от НСД с криптографическим распределением ключей в [9] сформулированы требования, которым должен удовлетворять рюкзачный вектор. Далее в [1] требования модифицированы следующим образом:

- рюкзачный вектор должен быть инъективным;
- задача о рюкзаке должна предполагать нахождение решение алгоритмом с вычислительной сложностью, не менее экспоненциальной;
- алгоритм построения инъективного рюкзака должен обладать вычислительной сложностью не более полиномиальной.

В [1] проведен анализ рюкзачных векторов на инъективность и получены результаты, позволяющие утверждать, что известные подходы не позволяют построить инъективный аддитивный рюкзак заданной сложности. Дальнейшее же исследование строится автором на предположении о возможности нахождения мультипликативных рюкзаков, удовлетворяющих введенным выше условиям.

Представление задачи об обобщенном мультипликативном рюкзаке. Рассмотрим обобщенный мультипликативный рюкзачный вектор $A_{MP} = (a_1, a_2, a_3, ..., a_n)$ с заданным пороговым значением p и множество целых значений степеней компонент рюкзака $Z_p = \{0,1,..., p-1\}$. Для заданного натурального числа V требуется установить, существует ли вектор $w = (\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n)$, $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n \in Z_p$, такой, что $a_1^{\alpha_1} \cdot a_2^{\alpha_2} \cdot ... \cdot a_n^{\alpha_n} = V$, и найти его, если он существует. Таким образом формулируется задача о рюкзаке с входом (A_{MP}, V).

В классических зарубежных [11–13] и отечественных [14, 15] научных работах приведен способ представления мультипликативных рюкзачных векторов, используемый для исследования их свойств. Применим это способ для исследования обобщенных мультипликативных рюкзаков на инъективность и формирования алгоритма построения рюкзачных векторов.

Рассчитаем значение $V' = a_1 \cdot a_2 \cdot ... \cdot a_n$. Построим вектор $P = (p_1, p_2, ..., p_m)$, составленный из всех простых делителей числа V'. Далее каждый из компонент заданного рюкзачного вектора $A_{MP} = (a_1, a_2, a_3, ..., a_n)$ представим как произведение степеней компонент вектора *P*:

$$\begin{aligned} a_1 &= p_1^{\alpha_{11}} \cdot p_2^{\alpha_{12}} \cdot ... \cdot p_m^{\alpha_{1m}} \\ a_2 &= p_1^{\alpha_{21}} \cdot p_2^{\alpha_{22}} \cdot ... \cdot p_m^{\alpha_{2m}} \\ &... \\ a_n &= p_1^{\alpha_{n1}} \cdot p_2^{\alpha_{n2}} \cdot ... \cdot p_m^{\alpha_{nm}} \end{aligned};$$

где $\alpha_{ij} \in \{0\} \cup N$ – степень простого числа p_j в разложении компоненты a_i.

Построим систему *m* аддитивных рюкзачных векторов

$$\begin{aligned} P_\alpha^{\,1} &= (\alpha_{11}, \alpha_{21}, ..., \alpha_{n1}) \\ P_\alpha^{\,2} &= (\alpha_{12}, \alpha_{22}, ..., \alpha_{n2}) \\ &... \\ P_\alpha^{\,i} &= (\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, ..., \alpha_{ni}) \\ &... \\ P_\alpha^{\,m} &= (\alpha_{1m}, \alpha_{2m}, ..., \alpha_{nm}) \end{aligned}. \quad (1)$$

Теперь рассмотрим число V, которое можно представить следующим образом $V = p_1^{v_1} \cdot p_2^{v_2} \cdot ... \cdot p_m^{v_m} \cdot v$, $(v, p_1^{v_1} \cdot p_2^{v_2} \cdot ... \cdot p_m^{v_m}) = 1$, где v может быть равным 1. Для применения задачи о рюкзаке в моделировании иерархической системы защиты интерес представляет случай, когда значение $v = 1$.

Рассмотрим векторы (1). Каждому из заданных векторов поставим в соответствие задачу о аддитивном рюкзаке с входом $(P_\alpha^{\,i}, v_i), i = \overline{1..n}$ для вектора $(v_1, v_2, v_3, ..., v_n)$. Существует вектор $w = (\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n)$, $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n \in Z_p$, являющейся решением каждой из задач об аддитивном рюкзаке с входом $(P_\alpha^{\,i}, v_i), i = \overline{1..n}$, то будем говорить, что этот вектор является решением системы задач об аддитивном рюкзаке.

Справедливо следующее утверждение.

Утверждение 1. Решение задачи об обобщенном мультипликативном векторе с входом (A_{MP}, V) эквивалентно решению системы задач об обобщенных инъективных векторах с входом $(P_\alpha^{\,i}, v_i), i = \overline{1..n}$, где $P_\alpha^{\,i} = (\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, ..., \alpha_{ni})$, $V = p_1^{v_1} \cdot p_2^{v_2} \cdot ... \cdot p_m^{v_m} \cdot v$.

Подобный способ представления задачи о мультипликативном рюкзаке в виде системы задач об инъективном, в целом, логичен и интуитивно понятен, тем не менее в современных исследованиях о возможности применения мультипликативных рюкзаков в криптографии не использовался для исследования свойств мультипликативного вектора. Например, в [16, 17] приведены уже известные условия инъективности мультипликативных рюкзаков, которые, как получено авторами [1], не позволяют находить алгоритмов

решения задачи или построения вектора требуемой сложности. В [18], например, не исследуется инъективность рюкзачных векторов, в [19] приведен частный случай диагонального супервозрастания для двоичного вектора решения, но не произведено полное исследование рюкзачного вектора на инъективность. В [9] авторами произведены попытки сформулировать гипотезы для условия инъективности обобщенного мультипликативного рюкзака, но доказательная база не приведена. На основании указанных результатов в следующим пункте обобщим условия инъективности мультипликативного рюкзака.

Условие инъективности мультипликативного рюкзака. Рассмотрим обобщенный мультипликативный рюкзачный вектор $A_{MP} = (a_1, a_2, a_3, ..., a_n)$ с заданным пороговым значением p и множество $Z_p = \{0,1,..., p-1\}$. Далее для вывода условий инъективности модифицируем векторы $P_\alpha^{\,i} = (\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, ..., \alpha_{ni})$, $i = \overline{1..n}$.

Важно, что некоторые из компонент данных векторов в общем случае равны . Преобразуем данную систему, убрав нулевые значения компонент и упорядочив их по возрастанию. Получим систему рюкзачных векторов

$$\begin{aligned} Q_\chi^{\,1} &= (\chi_{11}, \chi_{21}, ..., \chi_{k_1 1}) \\ Q_\chi^{\,2} &= (\chi_{12}, \chi_{22}, ..., \chi_{k_2 2}) \\ &... \\ Q_\chi^{\,i} &= (\chi_{1i}, \chi_{2i}, ..., \chi_{k_i i}) \\ &... \\ Q_\chi^{\,m} &= (\chi_{1m}, \chi_{2m}, ..., \chi_{k_m m}) \end{aligned} \quad . \qquad (2)$$

Утверждение 2. Для того, чтобы мультипликативный рюкзачный вектор $A_{MP} = (a_1, a_2, a_3, ..., a_n)$ был инъективен достаточно, чтобы аддитивные ранцы (2) были инъективны.

Доказательство этого утверждения было разработано автором в [20]

Отметим важность данного утверждения, оно формирует достаточное условие инъективности, но не необходимое, тем не менее, оно охватывает гораздо большее множество векторов, чем все рассмотренные ранее условия, так, достаточные условия инъективности из работ [16–19, 21] являются частными случаями условия из утверждения 2, что легко показать.

Кроме того, подобное условие позволяет представить задачу построения мультипликативного вектора как совокупность задач построения аддитивных векторов, что является, по сути, уже достаточно исследованной задачей и позволит осуществить поиск алгоритма построения такого вектора, который будет удовлетворять условиям, сформулированным в [1].

Таким образом, приведено авторское достаточное условие инъективности мультипликативного обобщенного вектора, являющееся обобщением существующих достаточных условий инъективности.

Алгоритм построения инъективного рюкзака. Теперь разработаем алгоритм построения инъективного мультипликативного обобщенного рюкзачного вектора (МОРВ). Отметим, что в процессе построения должен использоваться любой известный алгоритм получения инъективного аддитивного обобщенного рюкзачного вектора (АОРВ). Отметим изначально, что сложность такого алгоритма в среднем будет $T_{IA}(n) = O(n)$.

Для построения искомого МОРВ можно воспользоваться любым достаточным условием его инъективности. Выбор условия зависит от необходимой в рамках исследования сложности решения задачи о рюкзаке с входом (A_{MP}, V). Отметим, что для алгоритма будет использовано представление задачи об мультипликативном обобщенном рюкзаке в форме системы задач об аддитивных ранцах (1) и (2).

При этом, в общем случае, при использовании данного алгоритма решение получившейся задачи может иметь произвольную вычислительную сложность. В дальнейшем предполагается формализовать данный алгоритм так, что по заданному значению некоторых параметров можно получать вектор так, что задача с входом $\left(A_{MP}, V\right)$ будет иметь требуемую заранее сложность, как показано в [22].

Будем строить итерационный алгоритм. Такой алгоритм удобно применять, если необходимо иметь возможность динамически увеличивать размер вектора в процессе работы информационной системы, в частности, системы защиты от несанкционированного доступа.

Для разработки применим жадный алгоритм, то есть на каждой итерации разработки будем строить вектор размерности i так, чтобы он был инъективен. Далее предположим, что полученный вектор размерности n так же будет инъективен. Важно, что в рамках исследования рассматривается задача существования и единственности решения для входа $\left(A_{MP}, V\right)$, но не задача оптимизации, в связи с чем примененный метод построения эффективных алгоритмов «жадный алгоритм» позволит получить не приближенное решение с некоторой погрешностью, а точное решение.

Введем некоторые дополнительные понятия. Обозначим через A_{MP}^{i} МОРВ размерности *i.* При построении будем пользоваться таблицей простых чисел, и осуществлять случайный выбор простого числа. В рамках данного исследования качеество случайности значений рассмотрено не будет, хотя представляет интерес для дальнейших исследований.

Построение вектора будем осуществлять итерационно. На шаге i будем строить вектор A_{MP}^{i} так, чтобы он был инъективен, при условии, что вектор A_{MP}^{i-1}, построенный на предыдущем шаге так же инъективен. Для этого будем пользоваться полученным для вектора A_{MP}^{i-1} представлением (1). Каждый аддитивный вектор данного представления размерности *i-1* будем использовать для формирования нового вектора размерности *i*. При этом для формирования инъективного АОРВ используем любой существующий итерационный жадный алгоритм.

Для уменьшения вычислительной сложности разрабатываемого алгоритма и, как следствие, повышения его эффективности воспользуемся вторым утверждением.

С использованием этого условия на каждом шаге алгоритма мы будем добиваться инъективности векторов (2).

Теперь перейдем к построению инъективного МОРВ.

Построим вектор A_{MP}^{1}: вектор размерности 1. Выберем m_1 простых чисел $p_1, p_2, ..., p_{m_1}$, выберем m_1 значений $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_{m_1}$. Построим вектор $A_{MP}^{1} = \left(a_1\right) = \left(p_1^{\alpha_1} \cdot p_2^{\alpha_2} \cdot ... \cdot p_{m_1}^{\alpha_{m_1}}\right)$. Для данного вектора построим представления (1), (2).

$$V' = a_1 = p_1^{\alpha_1} \cdot p_2^{\alpha_2} \cdot ... \cdot p_{m_1}^{\alpha_{m_1}}.$$

$$P^1 = \left(p_1, p_2, ..., p_{m_1}\right);$$

$$P_\alpha\left(1\right) = \begin{pmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{12} \\ ... \\ \alpha_{1m_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ ... \\ \alpha_{m_1} \end{pmatrix};$$

$$P_\alpha^{\,1}\left(1\right) = \left(\alpha_{11}\right) = \left(\alpha_1\right);$$

$$P_\alpha^{\,2}\left(1\right) = \left(\alpha_{12}\right) = \left(\alpha_2\right);$$

...

$$P_\alpha^{\,m_1}\left(1\right) = \left(\alpha_{1m_1}\right) = \left(\alpha_{m_1}\right).$$

$$Q_\chi^{\,1}(1)=(\chi_{11})=(\alpha_{11})=(\alpha_1);$$
$$Q_\chi^{\,2}(1)=(\chi_{12})=(\alpha_{12})=(\alpha_2);$$
...
$$Q_\chi^{\,m_1}(1)=(\chi_{1m_1})=(\alpha_{1m_1})=(\alpha_{m_1}).$$

Полученные вектора $Q_\chi^{\,1}(1),Q_\chi^{\,2}(1),Q_\chi^{\,m_1}(1)$ примитивно инъективны, следовательно, по достаточному условию утверждения (2) построенный вектор $A_{MP}^1=(a_1)=\left(p_1^{\alpha_1}\cdot p_2^{\alpha_2}\cdot\ldots\cdot p_{m_1}^{\alpha_{m_1}}\right)$ примитивно инъективен.

Построим вектор A_{MP}^2. Первоначально рассмотрим представления (1) и (2) вектора $A_{MP}^1=(a_1)=\left(p_1^{\alpha_1}\cdot p_2^{\alpha_2}\cdot\ldots\cdot p_{m_1}^{\alpha_{m_1}}\right)$. Далее «отметим» произвольное число векторов из числа $P_\alpha^{\,1}(1),P_\alpha^{\,2}(1),\ldots,P_\alpha^{\,m_1}(1)$. Далее построим вектора

$$P_\alpha^{\,1}(2)=(\alpha_{11},\alpha_{21});$$
$$P_\alpha^{\,2}(2)=(\alpha_{12},\alpha_{22});$$
...
$$P_\alpha^{\,m_1}(2)=\left(\alpha_{1m_1},\alpha_{2m_1}\right)$$

так, чтобы соответствующие вектора $Q_\chi^{\,1}(2),Q_\chi^{\,2}(2),Q_\chi^{\,m_1}(2)$ остались аддитивно инъективными.

Для тех векторов, которые остались «неотмеченными», примем значения $\alpha_{2i}=0$, для остальных векторов необходимо получить значения α_{2j} так, чтобы рассматриваемые вектора остались инъективны. Для получения этих воспользуемся любым из алгоритмов получения инъективных аддитивных обобщенных рюкзачных векторов. В данном алгоритме воспользуемся итерацией, соответствующей получению вектора размерности (2). Отметим, что авторами разработано несколько алгоритмов получения инъективных АОРВ, [23–25]. Возможно воспользоваться любым из данных алгоритмов. Отметим, что разработаны программные реализации всех указанных алгоритмов.

После формирования системы векторов сформируем новые векторы $P_\alpha^{\,k}(2)=(0,\alpha_{2k})$ для новых простых значений p_k.

Для этого выберем случайным образом число $m_2'\in\{0\}\cup N$. После этого выберем m_2' простых чисел, которые не входят в вектор $P^1=\left(p_1,p_2,\ldots,p_{m_1}\right)$. Сформируем таким образом новый вектор P^2 размерности $m_2=m_2'+m_1$ $P^2=\left(p_1,p_2,\ldots,p_{m_2}\right)$. После этого дополним систему векторов следующим образом:

$$P_\alpha^{\,1}(2)=(\alpha_{11},\alpha_{21});$$
$$P_\alpha^{\,2}(2)=(\alpha_{12},\alpha_{22});$$
...
$$P_\alpha^{\,m_1}(2)=\left(\alpha_{1m_1},\alpha_{2m_1}\right);$$
$$P_\alpha^{\,m_1+1}(2)=\left(\alpha_{1(m_1+1)},\alpha_{2(m_1+1)}\right);$$
...
$$P_\alpha^{\,m_2}(2)=\left(\alpha_{1m_2},\alpha_{2m_2}\right).$$

В данной системе

$$\alpha_{1(m_1+1)} = 0, \ldots, \alpha_{1m_2} = 0,$$

а значения

$$\alpha_{2(m_1+1)}, \ldots, \alpha_{2m_2}$$

выбираются произвольным образом.

В результате сформирована система рюкзачных векторов

$$P_\alpha^{\,1}(2) = (\alpha_{11}, \alpha_{21});$$
$$P_\alpha^{\,2}(2) = (\alpha_{12}, \alpha_{22});$$
$$\ldots$$
$$P_\alpha^{\,m_2}(2) = (\alpha_{1m_2}, \alpha_{2m_2}).$$

Среди данных векторов есть векторы, в которых первая компонента нулевая, есть векторы, в которых вторая компонента нулевая, значит соответствующие им векторы из $Q_\chi^{\,1}(2), Q_\chi^{\,2}(2), Q_\chi^{\,m_2}(2)$ инъективны. Те же те из векторов $Q_\chi^{\,1}(2), Q_\chi^{\,2}(2), Q_\chi^{\,m_2}(2)$, которые состоят из двух компонент, остаются инъективны согласно алгоритму их формирования.

Далее из аддитивных рюкзачных векторов

$$P_\alpha^{\,1}(2) = (\alpha_{11}, \alpha_{21});$$
$$P_\alpha^{\,2}(2) = (\alpha_{12}, \alpha_{22});$$
$$\ldots$$
$$P_\alpha^{\,m_2}(2) = (\alpha_{1m_2}, \alpha_{2m_2})$$

и вектора $P^2 = (p_1, p_2, \ldots, p_{m_2})$ формируется мультипликативный обобщенный рюкзачный вектор $A_{MP}^2 = (a_1, a_2)$, где $a_1 = p_1^{\alpha_{11}} \cdot p_2^{\alpha_{12}} \cdot \ldots \cdot p_{m_2}^{\alpha_{1m_2}}, a_2 = p_1^{\alpha_{21}} \cdot p_2^{\alpha_{22}} \cdot \ldots \cdot p_{m_2}^{\alpha_{2m_2}}$.

Таким образом, сформирован алгоритм получения МОРВ $A_{MP}^2 = (a_1, a_2)$, на основании этого алгоритма предположим, что уже сформированы векторы $A_{MP}^2, A_{MP}^3, A_{MP}^4, \ldots, A_{MP}^n$. Требуется разработать алгоритм формирования вектора A_{MP}^{n+1}.

Для вектора $A_{MP}^n = (a_1, \ldots, a_n)$ существует разложение в систему инъективных аддитивных рюкзачных векторов

$$P_\alpha^{\,1} = (\alpha_{11}, \alpha_{21}, \ldots, \alpha_{n1})$$
$$P_\alpha^{\,2} = (\alpha_{12}, \alpha_{22}, \ldots, \alpha_{n2})$$
$$\ldots$$
$$P_\alpha^{\,i} = (\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, \ldots, \alpha_{ni})$$
$$\ldots$$
$$P_\alpha^{\,m} = (\alpha_{1m}, \alpha_{2m}, \ldots, \alpha_{nm})$$

по компонентам вектора $P = (p_1, p_2, \ldots, p_m)$. Необходимо построить инъективный мультипликативный обобщенный рюкзачный вектор размерности $n+1$ $A_{MP}^{n+1} = (a_1, \ldots, a_n, a_{n+1})$.

Для расширения рюкзачного вектора необходимо построить новую компоненту так, чтобы искомый вектор удовлетворял сформулированному ранее достаточному условию инъективности МОРВ (утверждение 2).

Формирование нового элемента будет происходить с помощью двух шагов.

Первый шаг состоит в дополнении вектора простых чисел $P=(p_1, p_2,..., p_m)$. Для этого выберем произвольное число $m_n \in \{0\} \cup N$. Далее выберем случайным образом $m_n \in \{0\} \cup N$ простых чисел, с учетом использования в данной таблице готовой таблицы простых чисел. Важно, что выбранные значения до этого не встречались в векторе $P=(p_1, p_2,..., p_m)$. Алгоритм выбора простых чисел из таблицы будет исследован позднее. Алгоритм проверки выбираемого простого числа на то, использовался ли он ранее будет рассмотрен авторами позже. С учетом модификации вектор $P=(p_1, p_2,..., p_m)$ станет равным $P=(p_1, p_2,..., p_m,..., p_{m'}), m'=m+m_n$.

Тогда изменится разложение МОРВ $A_{MP}^{n}=(a_1, \dots, a_n)$ на векторы

$$
\begin{aligned}
&P_{\alpha}{}^{1}=(\alpha_{11},\alpha_{21},...,\alpha_{n1})\\
&P_{\alpha}{}^{2}=(\alpha_{12},\alpha_{22},...,\alpha_{n2})\\
&\quad ...\\
&P_{\alpha}{}^{m}=(\alpha_{1m},\alpha_{2m},...,\alpha_{nm})\\
&P_{\alpha}{}^{m+1}=(\alpha_{1(m+1)},\alpha_{2(m+1)},...,\alpha_{n(m+1)})\\
&\quad ...\\
&P_{\alpha}{}^{m'}=(\alpha_{1m'},\alpha_{2m'},...,\alpha_{nm'})
\end{aligned}
.
$$

При этом важно, что последние m+1 векторы являются нулевыми. Соответственно вектора

$$
\begin{aligned}
&Q_{\chi}{}^{1}=(\chi_{11},\chi_{21},...,\chi_{k_1 1})\\
&Q_{\chi}{}^{2}=(\chi_{12},\chi_{22},...,\chi_{k_2 2})\\
&\quad ...\\
&Q_{\chi}{}^{m}=(\chi_{1m},\chi_{2m},...,\chi_{k_m m})\\
&\quad ...\\
&Q_{\chi}{}^{m'}=(\chi_{1m'},\chi_{2m'},...,\chi_{k_{m'}m'})
\end{aligned}
$$

остаются инъективными, причем выполняются равенства

$$k_{m+1}=0, k_{m+2}=0,..., k_{m'}=0.$$

Далее переходим к выполнению второго шага.

Для каждого из векторов

$$
\begin{aligned}
&P_{\alpha}{}^{1}=(\alpha_{11},\alpha_{21},...,\alpha_{n1})\\
&\quad ...\\
&P_{\alpha}{}^{m'}=(\alpha_{1m'},\alpha_{2m'},...,\alpha_{nm'})
\end{aligned}
$$

проведем следующие действия.

Рассмотрим вектор $P_{\alpha}^{\ i} = (\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, ..., \alpha_{ni})$.

Если $i \le m$, тогда выберем произвольным образом значение $\alpha_{(n+1)i} \in \{0\} \cup N$ так, что если $\alpha_{(n+1)i} > 0$, то соответствующий ему АОРВ $Q_{\chi}^{\ i}(n+1) = (\chi_{1i}, \chi_{2i}, ..., \chi_{(k_i+1)i})$ оставался инъективен. Напомним, что для формирования инъективного АОРВ следует воспользоваться одним из двух известных ранее алгоритмов, при условии, что вектор $Q_{\chi}^{\ i}(n) = (\chi_{1i}, \chi_{2i}, ..., \chi_{k_i i})$ на данной итерации мог удовлетворять любому из условий

$$k_i = 1$$
$$k_i = 2 .$$
$$k_i > 2$$

Об этом важно помнить, потому что алгоритм построения инъективного АОРВ работает по-разному в зависимости от указанных значений.

Если же $i > m$, то выберем произвольное значение $\alpha_{(n+1)i} \in N$. Тогда вновь построенные векторы $Q_{\chi}^{\ m+1}(n+1), Q_{\chi}^{\ m+2}(n+1), Q_{\chi}^{\ m'}(n+1)$ будут иметь размерность 1 и будут тривиально аддитивно инъективны.

В результате сформируем значение $a_{n+1} = p_1^{\alpha_{(n+1)1}} \cdot p_2^{\alpha_{(n+1)2}} \cdot ... \cdot p_{m'}^{\alpha_{(n+1)m'}}$ и инъективный мультипликативный обобщенный рюкзачный вектор размерности $n+1$ $A_{MP}^{n+1} = (a_1, ..., a_n, a_{n+1})$.

Таким образом, в данной статье разработан алгоритм построения инъективного обобщенного мультипликативного рюкзачного вектора. Приведенный алгоритм является рекурсивным алгоритмом, а значит он будет не эффективен с точки зрения используемой оперативной памяти. Это не позволит использовать данный алгоритм для построения мультипликативного рюкзака целиком, но такая особенность алгоритма позволяет в произвольный момент времени для инъективного мультипликативного рюкзака добавлять ещё одну компоненту так, чтобы новый вектор оставался инъективным. Такое свойство позволит обеспечить выполнение одного из основных требований к иерархической системе защиты от НСД, а именно возможность динамического расширения системы [1–4]. Далее этот алгоритм будет использован для добавления объектов и субъектов в иерархическую модель управления доступом и для динамического обновления структуры объектов и субъектов в проектируемой модели.

Заключение. Таким образом, получены следующие результаты:

- приведено доказанное автором ранее достаточное условие инъективности мультипликативного вектора и показано, что данное условие покрывает гораздо большее количество векторов, чем сформулированные на данный момент достаточные условия инъективности;
- на основании данного условия разработан рекурсивный алгоритм построения инъективного МОРВ.

В работе показано, что данный алгоритм имеет перспективы применения для обеспечения возможности динамического расширения иерархической системы защиты информации от НСД с криптографическим распределением ключей. Проанализирована возможность его применения для моделирования иерархической мандатной модели защиты информации от несанкционированного доступа. Анализ показывает, как можно применять уже известные алгоритмы построения рюкзачных векторов, как часть разработанного алгоритма. Итерационный алгоритм далее будет применятся для динамического расширения разрабатываемой системы как в ширину, так и в глубину. Полученные результаты позволят в рамках общей цели исследования разработать искомую модель защиты от НСД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лернер В.Д.* Криптографическое распределение ключей для защиты информации в иерархических системах // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 5 (6). – С. 37-43.
2. *Chen M., Mao S., Zhang Y., Leung C.M.* Big data. Related technologies, challenges, and future prospects. – Springer, 2014. – 100 p.
3. *Akl S.G., Taylor P.D.* Cryptographic solution to a problem of access control in hierarchy // ACM Transactions on computer systems. – 1983. – No. 1 (3). – P. 239-248.
4. *Лернер В.Д., Беззатеев С.В.* Основные принципы распределения ключей для доступа к информации в облачных хранилищах данных // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2011): VII Санкт-Петербургская межрегион. конф., Санкт-Петербург, 26-28 октября 2 11 г.: Матер. конф. – СПОИСУ. – СПб., 2 11. – С. 120.
5. *Жук А.С., Головской В.А.* Синтез иерархической системы защиты информации от несанкционированного доступа на основании модели Белла-ЛаПадулы // Тр. Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. Ч. II. – Ростов-на-Дону: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2 17. – С. 9 -97.
6. *Щеглов А.Ю.* Модели, методы и средства контроля доступа к ресурсам вычислительных систем. – СПб.: Университет ИТМО, 2 14. – 95 с.
7. *Bell D.E.* Looking Back at the Bell-LaPadula Model // 21st Annual Computer Security Applications Conference. Tucson, Arizona, USA, 2005. – P. 337-351.
8. *Усов С.В.* О связи между объектно-ориентированной дискреционной и субъектно-объектной мандатной моделями безопасности // Математические структуры и моделирование. – 2016. – № 4 (4). – С. 151-163.
9. *Жук А.С., Осипян В.О.* Условия инъективности мультипликативного обобщенного рюкзачного вектора // Специальная связь и безопасность информации (ССБИ-2 16): Сб. трудов. Международная НПК. – Краснодар: Краснодарский центр научно-технической информации (ЦНТИ), 2016. – С. 92-97.
10. *Жук А.С., Головской В.А.* Исследование возможности применения обобщенных инъективных рюкзачных векторов для моделирования системы защиты информации от НСД // Тр. Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2018. – № 2. – С. 11 -115. – EDN WALPYX.
11. *Martello S.T.P.* Knapsack problems: algorithms and computer implementations. – Chichester: JOHN WILEY & SONS, 1990. – P. 137-138.
12. *Shamir A.* A polynomial-time algorithm for breaking the basic Merkle - Hellman cryptosystem // Information Theory, IEEE Transactions. – 1984. – Vol. 30, No. 5. – P. 699-704.
13. *Odlyzhko A.O.* Cryptanalytic attacks on the multiplicative knapsack cryptosystem and on Shamir's fast signature scheme // IEEE Transactions on Information Theory. – Jul 1984. – Vol. IT-30, No. 4. – P. 594-601.
14. *Осипян В.О.* Моделирование систем защиты информации содержащих диофантовы трудности. Разработка методов решений многостепенных систем диофантовых уравнений. Разработка нестандартных рюкзачных криптосистем: монография. – LAP, 2012. – 344 с.
15. *Осипян В.О.* О системе защиты информации на основе проблемы рюкзака // Известия ТПУ. – 2006. – № 2. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-sisteme-zaschity-informatsii-na-osnove-problemy-ryukzaka (дата обращения: 28. 1.2 19).
16. *Осипян В.О., Лейман А.В., Чесебиев А.А., Жук А.С., Арутюнян А.Х., Карпенко Ю.А.* Математическое моделирование нестандартных мультипликативных ранцевых криптосистем // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2017. – № 2. – С. 57-64.
17. *Osipyan V.O.* Buiding of alphabetic data protection cryptosystems on the base of equal power knapsacks with Diophantine problems // ACM. – 2012. – P. 124-129.
18. *Животова А.Е., Зюляркина Н.Д., Костыгина Ю.О.* Модификация криптосистемы с открытым ключом на основе «задачи о рюкзаке // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – 2014. – № 1 (11). – С. 16-20.
19. *Шевляков Т.Н.* Мультипликативная рюкзачная криптосистема // Вестник ОмГУ. – 2011. – № 4. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/multiplikativnaya-ryukzachnaya-kript sistema (дата обращения: 28. 1.2 19).
20. *Osipyan V.O., Zhuk A.S., Lukashchik E.P. [et al.].* Multiplicative knapsack injectivity as condition of effective unauthorized access protection // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2131, No. 2. – P. 022084. – DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022084.
21. *Жук А.С., Головской В.А.* Анализ вычислительной сложности решения задачи о мультипликативном рюкзаке. Т. 78 // Тр. Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. Ч. II. – Ростов-на-Дону: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2 17. – 441 с. – С. 81-90.

22. *Жук А.С., Кисленко И.А.* Разработка математических моделей условий снижения вычислительной сложности алгоритмов решения задачи об обобщенном мультипликативном рюкзаке // Сб. статей XVIII военно-научной конференции курсантов и операторов научной роты Краснодарского высшего военного училища имени генерала армии С.М. Штеменко. – Краснодар: КВВУ, 2016. – С. 86-96.
23. *Осипян В.О., Жук А.С., Арутюнян А.Х., Карпенко Ю.А.* Построение криптосистем с открытым ключом на основе задач о нестандартном рюкзаке // ММиИТС: Тр. V Всерос. н/п конф.24 июня 2 11, КУ МВД России. – С. 12-15.
24. *Подколзин В.В., Осипян В.О.* О свойствах рюкзачных систем защиты информации с открытым ключом в Zp // Вестник СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – 2010. – № 3. – С. 51-55.
25. *Осипян В.О., Мирзаян А.В.* Сравнительный анализ криптостойкости классической и обобщенной рюкзачной криптосистем // Математические методы и информационно-технические средства: Тр. Всерос. науч.-практич. конф. Краснодар, 24 июня 2 5. – С. 34-36.

REFERENCES

1. *Lerner V.D.* Kriptograficheskoe raspredelenie klyuchey dlya zashchity informatsii v ierarkhicheskikh sistemakh [Cryptographic key distribution for information protection in hierarchical systems], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, No. 5 (60), pp. 37-43.
2. *Chen M., Mao S., Zhang Y., Leung C.M.* Big data. Related technologies, challenges, and future prospects. Springer, 2014, 100 p.
3. *Akl S.G., Taylor P.D.* Cryptographic solution to a problem of access control in hierarchy, *ACM Transactions on computer systems,* 1983, No. 1 (3), pp. 239-248.
4. *Lerner V.D., Bezzateev S.V.* Osnovnye printsipy raspredeleniya klyuchey dlya dostupa k informatsii v oblachnykh khranilishchakh dannykh [Basic principles of key distribution for access to information in cloud data storage], *Informatsionnaya bezopasnost' regionov Rossii (IBRR-2011): VII Sankt-Peterburgskaya mezhregion. konf., Sankt-Peterburg, 26-28 oktyabrya 2011 g.: Mater. konf.* [Information security of Russian regions (ISRR-2011): VII St. Petersburg interregional conference, St. Petersburg, October 26-28, 2011: Conference materials]. SPOISU. Saint Petersburg, 2011, pp. 120.
5. *Zhuk A.S., Golovskoy V.A.* Sintez ierarkhicheskoy sistemy zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa na osnovanii modeli Bella-LaPaduly [Synthesis of a hierarchical information protection system against unauthorized access based on the Bell-LaPadula model], *Tr. Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasus Branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics]. Part II. Rostov-on-D n: PTS «Universitet» SKF MTUSI, 2 17, pp. 9 -97.
6. *Shcheglov A.Yu.* Modeli, metody i sredstva kontrolya dostupa k resursam vychislitel'nykh system [Models, methods and means of access control to resources of computing systems]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2014, 95 p.
7. *Bell D.E.* Looking Back at the Bell-LaPadula Model, *21st Annual Computer Security Applications Conference. Tucson, Arizona, USA, 2005*, pp. 337-351.
8. *Usov S.V.* O svyazi mezhdu ob"ektno-orientirovannoy diskretsionnoy i sub"ektno-ob"ektnoy mandatnoy modelyami bezopasnosti [On the relationship between object-oriented discretionary and subject-object mandatory security models], *Matematicheskie struktury i modelirovanie* [Mathematical structures and modeling], 2016, No. 4 (40), pp. 151-163.
9. *Zhuk A.S., Osipyan V.O.* Usloviya in"ektivnosti mul'tiplikativnogo obobshchennogo ryukzachnogo vektora [Injectivity conditions of the multiplicative generalized backpack vector], *Spetsial'naya svyaz' i bezopasnost' informatsii (SSBI-2016): Sb. trudov. Mezhdunarodnaya NPK* [Special Communications and Information Security (SSBI-2016): Collection of Works. International Scientific and Practical Conference]. Krasnodar: Krasnodarskiy tsentr nauchno-tekhnicheskoy informatsii (TSNTI), 2016, pp. 92-97.
10. *Zhuk A.C., Golovskoy V.A.* Issledovanie vozmozhnosti primeneniya obobshchennykh in"ektivnykh ryukzachnykh vektorov dlya modelirovaniya sistemy zashchity informatsii ot NSD [Study of the possibility of using generalized injective backpack vectors for modeling an information security system against unauthorized access], *Tr. Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasian branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics], 2018, No. 2, pp. 110-115. EDN WALPYX.
11. *Martello S.T.P.* Knapsack problems: algorithms and computer implementations. Chichester: JOHN WILEY & SONS, 1990, pp. 137-138.
12. *Shamir A.* A polynomial-time algorithm for breaking the basic Merkle - Hellman cryptosystem, *Information Theory, IEEE Transactions,* 1984, Vol. 30, No. 5, pp. 699-704.

13. *Odlyzhko A.O.* Cryptanalytic attacks on the multiplicative knapsack cryptosystem and on Shamir's fast signature scheme, *IEEE Transactions on Information Theory,* Jul 1984, Vol. IT-30, No. 4, pp. 594-601.
14. *Osipyan V.O.* Modelirovanie sistem zashchity informatsii soderzhashchikh diofantovy trudnosti. Razrabotka metodov resheniy mnogostepennykh sistem diofantovykh uravneniy. Razrabotka nestandartnykh ryukzachnykh kriptosistem: monografiya. LAP, 2012, 344 p.
15. *Osipyan V.O.* O sisteme zashchity informatsii na osnove problemy ryukzaka [On the information security system based on the backpack problem], *Izvestiya TPU* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2006, No. 2. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/o-sisteme-zaschity-informatsii-na-osnove-problemy-ryukzaka (accessed 28 January 2019).
16. *Osipyan V.O., Leĭman A.V., Chesebiev A.A., Zhuk A.S., Arutyunyan A.Kh., Karpenko Yu.A.* Matematicheskoe modelirovanie nestandartnykh mul'tiplikativnykh rantsevykh kriptosistem [Mathematical modeling of non-standard multiplicative knapsack cryptosystems], *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2017, No. 2, pp. 57-64.
17. *Osipyan V.O.* Buiding of alphabetic data protection cryptosystems on the base of equal power knapsacks with Diophantine problems, *ACM,* 2012, pp. 124-129.
18. *Zhivotova A.E., Zyulyarkina N.D., Kostygina Yu.O.* Modifikatsiya kriptosistemy s otkrytym klyuchom na osn ve «zadachi ryukzake [Modification of a public-key crypt system based n the "knapsack pr b em"], *Vestnik UrFO. Bezopasnost' v informatsionnoy sfere* [Bulletin of the Ural Federal District. Information Security], 2014, No. 1 (11), pp. 16-20.
19. *Shevlyakov T.N.* Mul'tiplikativnaya ryukzachnaya kriptosistema [Multiplicative backpack cryptosystem], *Vestnik OmGU* [Bulletin of Omsk State University], 2011, No. 4. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/multiplikativnaya-ryukzachnaya-kriptosistema (accessed 28 January 2019).
20. *Osipyan V.O., Zhuk A.S., Lukashchik E.P. [et al.].* Multiplicative knapsack injectivity as condition of effective unauthorized access protection, *Journal of Physics: Conference Series,* 2021, Vol. 2131, No. 2, pp. 022084. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022084.
21. *Zhuk A.S., Golovskoy V.A.* Analiz vychislitel'noy slozhnosti resheniya zadachi o mul'tiplikativnom ryukzake [Analysis of the computational complexity of solving the multiplicative knapsack problem]. Vol. 78, *Tr. Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasus Branch of Moscow Technical University of Communications and Informatics]. Part II. Rostov-on-D n: PTS «Universitet» SKF MTUSI, 2 17, 441 p., pp. 81-90.
22. Zhuk A.S., Kislenko I.A. Razrabotka matematicheskikh modeley usloviy snizheniya vychislitel'noy slozhnosti algoritmov resheniya zadachi ob obobshchennom mul'tiplikativnom ryukzake [Development of mathematical models of conditions for reducing the computational complexity of algorithms for solving the generalized multiplicative knapsack problem], *Sb. statey XVIII voenno-nauchnoy konferentsii kursantov i operatorov nauchnoy roty Krasnodarskogo vysshego voennogo uchilishcha imeni generala armii S.M. Shtemenko* [Collection of articles of the XVIII military-scientific conference of cadets and operators of the scientific company of the Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S.M. Shtemenko]. Krasnodar: KVVU, 2016, pp. 86-96.
23. *Osipyan V.O., Zhuk A.S., Arutyunyan A.Kh., Karpenko Yu.A.* Postroenie kriptosistem s otkrytym klyuchom na osnove zadach o nestandartnom ryukzake [Construction of public-key cryptosystems based on non-standard knapsack problems], *MMiITS: Tr. V Vseros. n/p konf.24 iyunya 2011, KU MVD Rossii* [MMiITS: Proceedings of the V All-Russian scientific conference. June 24, 2011, KU MVD of Russia], pp. 12-15.
24. *Podkolzin V.V., Osipyan V.O.* O svoystvakh ryukzachnykh sistem zashchity informatsii s otkrytym klyuchom v Zp [On the properties of backpack information security systems with an open key in Zp], *Vestnik SibGU im. M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State University named after M.F. Reshetnev], 2010, No. 3, pp. 51-55.
25. *Osipyan V.O., Mirzayan A.V.* Sravnitel'nyy analiz kriptostoykosti klassicheskoy i obobshchennoy ryukzachnoy kriptosistem [Comparative analysis of cryptographic resistance of classical and generalized backpack cryptosystems], *Matematicheskie metody i informatsionno-tekhnicheskie sredstva: Tr. Vseros. nauch.-praktich. konf. Krasnodar, 24 iyunya 2005* [Mathematical methods and information technology tools: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference. Krasnodar, June 24, 2005], pp. 34-36.

Жук Арсений Сергеевич – Кубанский государственный университет; e-mail: arseniyzhuck@mail.ru; г. Краснодар, Россия, тел.: 89384754442; старший преподаватель кафедры вычислительных технологий.

Zhuck Arseniy Sergeevich – Kuban State University; e-mail: arseniyzhuck@mail.ru; Krasnodar, Russia, phone: +79384754442; senior lecturer; the Department of Computer Technologies.

Раздел II. Анализ данных, моделирование и управление

УДК 007.52:629.3.05 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-92-102

В.А. Костюков

МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАЗНЕСЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ГРУППЫ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ ПРЕПЯТСТВИЙ

При разработке алгоритмов планирования путей роботов, образующих группу, возникает проблема обеспечения гарантированного их не столкновения друг с другом и с возможными препятствиями. Кроме того, для группы может действовать требование поддержания заданного шаблона строя там, на тех участках движения группы, где это возможно с учетом препятствий. Однако часто образуется узкий пространственный коридор допустимого движения группы, который может быть обусловлен как исходными требованиями к траектории (например, условие нахождения ее в некоторой окрестности заданной точки), так и наличием препятствий и прочих помеховых воздействий. Наличие такого ограничительного коридора может привести к вынужденному сближению и даже пересечению пространственных траекторий движения отдельных роботов группы. Одним из возможных решений указанной проблемы является задание или корректировка временных параметрических представлений этих индивидуальных траекторий так, чтобы два робота с близко подходящими друг к другу пространственными траекториями в наиболее близких их точках находились в разное время. Причем интервал времени, отделяющий моменты нахождения этих двух роботов в этих точках, должен выбираться в зависимости от скорости роботов и их габаритов. На этой идее основан развиваемый метод пространственно-временного разнесения траекторий отдельных роботов группы. Метод подразумевает формирование и решение специальной задачи линейного программирования относительно целевых моментов времени ранее выделенных узлов пространственной траектории каждого ведомого робота. Ограничивающим фактором на изменение этих моментов выступает максимально возможная скорость перемещения робота. Для каждого робота производится предварительное выделение набора траекторий других роботов группы, от которых далее необходимо отстроиться в пространстве-времени. Это происходит в зависимости от приоритета роботов в группе. Приводятся примеры численной реализации алгоритма на базе предлагаемого метода, подтверждающие его эффективность.

Планирование пути группы роботов; пространственная траектория; временное параметрическое представление траектории; пространственно-временное разнесение близких траекторий; полигональные препятствия.

V.A. Kostyukov

METHOD OF SPATIAL-TEMPORAL DIVERSITY OF TRAJECTORIES OF A GROUP OF ROBOTS IN THE CONTEXT OF OBSTACLES

When developing algorithms for planning the paths of robots forming a group, the problem of ensuring that they do not collide with each other and with possible obstacles arises. In addition, the group may be required to maintain a given formation template in those sections of the group's movement where this is possible taking into account obstacles. However, a narrow spatial corridor of permissible movement of the group is often formed, which can be caused by both the initial requirements for the trajectory (for example, the condition of its location in a certain vicinity of a given point), and the presence of obstacles and other interference effects. The presence of such a restrictive corridor can lead to a forced convergence and even intersection of the spatial trajectories of movement of individual robots in the group. One possible solution to this problem is to specify or adjust the time parametric representations of these individual trajectories so that two robots with spatial trajectories approaching each other are at their closest points at different times. Moreover, the time interval separating the moments of these two robots being at these points should be selected depending on the speed of the robots and their dimensions. The developed method of space-time separation of the trajectories of individual robots in a group is based on this idea. The method involves the for-

mation and solution of a special linear programming problem relative to the target moments of time of previously selected nodes of the spatial trajectory of each slave robot. The limiting factor for changing these moments is the maximum possible speed of the robot. For each robot, a preliminary selection of a set of trajectories of other robots in the group is made, from which it is then necessary to detach in space-time. This occurs depending on the priority of the robots in the group. Examples of numerical implementation of the algorithm based on the proposed method are given, confirming its effectiveness.

Path planning for a group of robots; spatial trajectory; temporal parametric representation of the trajectory; space-time separation of close trajectories; polygonal obstacles.

Введение. Для планирования движения группы роботов в условиях препятствий актуальной задачей является переконфигурирование их строя. На движение группы может быть наложено требование движения строем с заданным шаблоном, а также допустимая степень отклонения от этого шаблона.

Задача движения строем с заданным шаблоном является актуальной при решении различных задач, таких как слежение группой за целью [1], ретрансляция связи [2], движение колонной или шеренгой [3], картографирование и георазведка [4], обследование местности и поиск объектов [5]. Поддержание заданного шаблона строя используется при создании многопозиционных радиолокационных систем с использованием БпЛА [6–8], а также при проведении сейсморазведки группой АНПА [9, 10].

Однако данная задача весьма осложняется при наличии препятствий и/ или помеховых воздействий разной природы [11].

Действительно, перестроение по тому или иному геометрическому правилу в зависимости от конкретных форм препятствий и сцен весьма громоздко, если вообще возможно. Поэтому надо разработать метод перестроения, работоспособный для всех типов препятствий, но имеющий невысокую вычислительную сложность.

При этом само перестроение может не иметь детерминированный характер в отношении промежуточных конфигураций, однако должны быть гарантированы следующие условия: а) центры роботов группы должны не выходить за границу некоторого круга заданного радиуса, проведенного из геометрического центра всей группы (окрестность расширения группы); б) отдельные роботы группы не должны приближаться друг к другу более чем на заданное охранное расстояние. Кроме того, если для группы критичным является достаточно точное соблюдение заданного шаблона строя, тогда добавляется еще одно условие: в) в случае, когда позволяет текущая часть сцены с препятствиями, где находится группа в данный момент времени, группа должна соблюдать заданный шаблон строя.

Описанный выше метод может быть реализован, например, с помощью следующего, описываемого ниже, алгоритма.

Базовый алгоритм метода корректировки временных параметрических представлений траекторий роботов в условиях препятствий. Поставленную выше задачу будем решать в три этапа.

На первом этапе в условиях заданной сцены находим траекторию движения ведущего робота группы.

На втором этапе строим специальный коридор относительно этой траектории – такое односвязное подмножество плоскости, что если формально простроить все траектории движения ведомых роботов с учетом их виртуальных положений согласно шаблону строя, но без учета карты препятствий, то эти траектории будут принадлежать этому подмножеству.

Далее, на третьем этапе, происходит построение предварительных траекторий для каждого ведомого робота в условиях препятствий, принадлежащих данному подмножеству, в результате чего получаем кусочно-ломаные пространственные траектории, соответствующие каждого робота и не пересекающие ни одно из препятствий.

В завершение, на четвертом этапе, строим временные параметрические представления построенных траекторий каждого робота с учетом требований: а), б) и в). При этом для соблюдения требований б) и в) локально мы применяем специальный метод разнесения взаимно близких участков каждого робота в любой момент времени из заданного интервала.

Для нахождения траекторий как ведущего робота в исходной сцене, так и ведомых роботов для построенного коридора предполагается использовать планировщик на базе метода характеристического графа видимости (МХГВ) [12].

Однако можно также использовать методы на базе клеточной декомпозиции [13, 14]. Заметим, что в случае сильно ограниченного коридора движения метод диаграмм Вороного [15] не подойдет.

Рассмотрим особенности реализации четвертого этапа.

Прежде всего, введем понятие приоритета в отталкивании путем обобщения подхода, рассмотренного в [16]. Грубо это означает, что все роботы группы упорядочиваются таким образом, что данный k-й робот должен отталкиваться от центров всех других роботов с меньшим номером и большим приоритетом при условии, что эти роботы находятся в некоторой круговой ее окрестности. Ведущий робот, идущий первым, не должен отталкиваться ни от какого другого, потому что все роботы должны равняться на него.

Проанализируем степень близости двух кривых с учетом временной координаты следующим образом. Пусть имеем две кусочно-ломаные кривые, полученные после применения планировщика МХГВ. Вначале считаем, что точки первой из траекторий корректировать не надо и будем корректировать только вторую траекторию. Для этого рассмотрим траектории в трехмерном пространстве, две первые координаты которого есть координаты плоскости пространственного движения, а третья – временная. Все узлы получившейся для одной из траекторий кусочно-ломаной в расширенном трехмерном пространстве упорядочены в соответствии со своими номерами. Причем узлу с большим номером соответствует строго большее время, откладываемое по третьей координате расширенного пространства.

Далее, для каждого узла второй траектории в расширенном трехмерном пространстве, подлежащей корректировке, определяем те точки первой, которые попали в шар заданного ограничительного радиуса. Далее организуем процедуру отталкивания выбранного узла от этих точек первой кривой, которая прекращается, когда внутри ограничительного радиуса этой точки после смещения не будет каких-либо точек первой траектории. Затем точно такой же процедуре подвергаем следующую точку первой кривой и т.д.

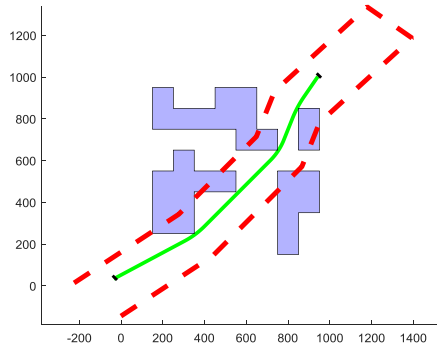
На рис. 1,а показана первоначально спланированная пространственная траектория для ведущего робота; здесь же показан *коридор*, внутри которого, согласно шаблону строя, должны были бы двигаться элементы группы в случае отсутствия препятствий.

Шаблон строя представляет собой треугольник (рис. 1,б); проставлены номера упорядоченной совокупности элементов группы, меньшему номеру соответствует больший приоритет в указанном выше смысле.

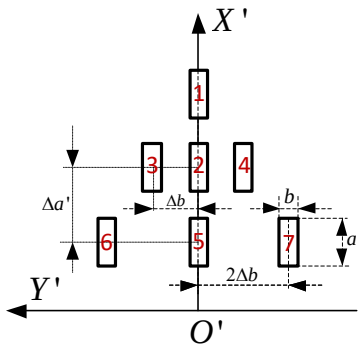
В рассматриваемом же случае наличия препятствий необходимо построить предварительные траектории движения каждого ведомого элемента *внутри этого коридора с учетом препятствий*. Эти траектории показаны красными линиями на рис. 1,а; здесь же показана полигональная невыпуклая зона, полученная объединением внешнего интегрального многоугольника коридора со всеми препятствиями сцены. На рис, 1,в показаны в увеличенном виде некоторые характерные зоны сцены с предварительно построенными кусочно-линейными траекториями для отдельных элементов группы. Из этих рисунков, в частности, видно, что точками старта и финиша для каждого робота группы являются их соответственные положения в строю согласно заданному шаблону, в начальный и конечный моменты времени.

Как видно из рис. 1,а,б, первоначальные траектории отдельных роботов на некоторых участках своего пути подходят достаточно близко друг к другу, поэтому необходима процедура отделения, отдаления взаимно близких участков разных пар траекторий друг относительно друга. При этом заранее не известно, подходят ли фактически два робота близко друг к другу, или их нахождение в близких пространственных точках достаточно разнесено во времени. Заметим, что процедура пространственной корректировки кривых, близко подходящих друг к другу, затруднена наличием препятствий, что существенно

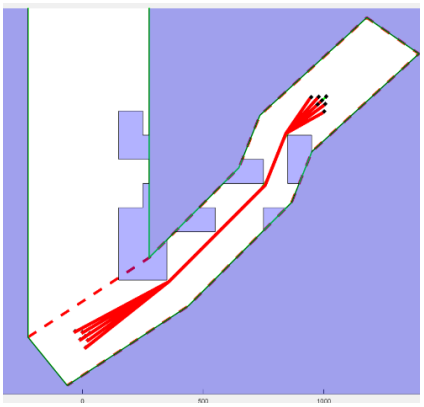
стесняет возможности такой корректировки. Однако сами пространственные кривые, спланированные по методу характеристического графа видимости, подходят достаточно близко к препятствиям (см. рис. 1,б), поэтому даже небольшое локальное перепланирование некоторых траекторий может привести к их пересечению с препятствиями.



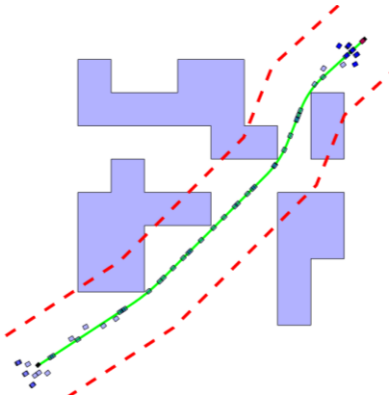
а – планирование траектории ведущего робота в среде с препятствиями



б – заданный шаблон строя



в – предварительные траектории движения каждого ведомого элемента внутри построенного коридора с учетом препятствий



г – визуализация некоторых промежуточных положений движущейся группы

Рис. 1. К определению индивидуальных траекторий элементов группы в конфликтной среде с препятствиями

Единственным приемлемым вариантом является произвести разнесение не пространственных кривых, а соответствующих им пространственно-временных, фазовых, кривых.

Способ корректировки узлов пространственно-временных кусочно-ломаных отдельных роботов с учетом разнесения близких точек в пространстве $\mathbb{R}^3$. Опишем главный для искомого алгоритма планирования процесс построения таких пространственно-временных кривых, которые далее будем называть расширенными кусочно-ломаными в трехмерном пространстве «x*y*t». Эти кривые из $\mathbb{R}^3$ есть просто одно из возможных представлений параметризации пространственных кривых в $\mathbb{R}^2$. Этим кривым соответствуют следующие матрицы:

для кусочно-ломаной ведущего (1-го) робота:

$$\hat{P}^{(1)} = \begin{pmatrix} vt_1 & vt_2 & \dots & vt_u & \dots & vt_U \\ x_1^{(1)} & x_2^{(1)} & \dots & x_u^{(1)} & \dots & x_U^{(1)} \\ y_1^{(1)} & y_2^{(1)} & \dots & y_u^{(1)} & \dots & y_U^{(1)} \end{pmatrix}; \quad (1)$$

для *расширенной* кусочно-ломаной j-го ведомого j>1*:*

$$\hat{P}^{(j)} = \begin{pmatrix} vt_1 & vt_2 & \dots & vt_u & \dots & vt_U \\ x_1^{(j)} & x_2^{(j)} & \dots & x_u^{(j)} & \dots & x_U^{(j)} \\ y_1^{(j)} & y_2^{(j)} & \dots & y_u^{(j)} & \dots & y_U^{(j)} \end{pmatrix}, j = 2,..,N_g, \quad (2)$$

где использован нормирующий множитель v, который целесообразно считать равным крейсерской скорости роботов. Обозначим также $P^{(j)}$ результат удаления первой строки из матрицы $\hat{P}^{(j)}$ для всех j.

В этих матрицах первые строки выражают дискретные временные отсчеты $t_u = \frac{T(u-1)}{U-1}, u = 1,2,..,U$; вторая и третья – соответствующие координаты дискретных точек в эти моменты для данного робота.

Представление (1) для траектории ведущего робота далее меняться не будет; представления (2) для траекторий ведомых роботов далее меняться будут. Причем эти изменения будем проводить так, чтобы между самыми близкими участками каждой пары кривых двух роботов было расстояние в расширенном пространстве $\mathbb{R}^3$ не меньше заданного $D_{\mathbb{R}^3.min}$.

Далее производим для каждого представления типа (2) следующие действия. Для каждой точки расширенного пространства $\hat{P}_u^{(j)} = (vt_u, x_u^{(j)}, y_u^{(j)})^T$ находим набор $SetP(\hat{P}_u^{(j)})$ ближайших точек на всех кусочно-ломаных, попадающих в окрестность $D_{\mathbb{R}^3.min}$ относительно точки $\hat{P}_u^{(j)}$ и индуцированных всеми другими представлениями роботов с приоритетом, большим чем у данного робота; каждая точка этого набора находится на минимальном расстоянии до $\hat{P}_u^{(j)}$ в $\mathbb{R}^3$. Пусть K_{ju} – число таких точек. Введем обозначения: $SetP(\hat{P}_u^{(j)})(1,:)$ – набор дискретных нормированных временных отсчетов для всех точек набора, есть вектор-строка длины K_{ju}; $SetP(\hat{P}_u^{(j)})(2:3,:)$ – набор абсцисс и ординат, соответствующих этим отсчетам, есть матрица $2 \times K_{ju}$.

После этого решаем следующую задачу линейного программирования [17] для каждого ведомого *j*-го робота:

$$At^{(j)} \le b^{(j)}, \quad (3)$$

$$l^{(j)} \le t^{(j)} \le q^{(j)}, \quad (4)$$

где

$$A_{U-1\times U-1} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & ... & . & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & ... & 0 & . & 0 \\ 0 & 0 & 1 & ... & ... & ... & ... & ... \\ ... & ... & ... & ... & . & . & 0 & 0 \\ 0 & . & 0 & ... & . & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & ... & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$b_u^{(j)} = \left\{ b_u^{(j)}, u = 2,..,U \right\},$$

$$b_u^{(j)} = -\frac{1}{V_{max}} \left| P_u^{(j)} - P_{u-1}^{(j)} \right|, \quad (6)$$

$$l^{(j)} = \left\{ l_u^{(j)}, u = 2,..,U \right\}, \quad (7)$$

$$l_u^{(j)} = \begin{matrix} \max \\ 1 \le i \le K_{ju} \end{matrix} \left\{ SetP\left(\hat{P}_u^{(j)}\right)(1,i) + \Delta\hat{t}_{uji} \right\}, \text{если } SetP\left(\hat{P}_u^{(j)}\right) \neq \emptyset \Bigg\}, \quad (8)$$

$$0, \text{иначе}$$

$$\Delta\hat{t}_{uji} = \sqrt{D_{\mathbb{R}^3,min}^2 - \left| SetP\left(\hat{P}_u^{(j)}\right)(2:3,i) - P_u^{(j)} \right|^2}, \quad (9)$$

$$\left(q^{(j)}\right)_{U-1,1} = [vT, vT, .., vT]^T. \quad (10)$$

Система неравенств (3) порождена требованием, чтобы каждый последующий временной отсчет отстоял от предыдущего не менее, чем на $\frac{v}{V_{max}}\left|P_u^{(j)} - P_{u-1}^{(j)}\right|$, что соответствует физической достижимости каждой следующей пространственной точки $P_u^{(j)}$ из предыдущей $P_{u-1}^{(j)}$ с учетом максимальной скорости V_{max}, которую может развить робот.

Неравенства (4) отвечают условию, что u-й узел расширенной ломаной j-го робота должен быть отстроен вверх от каждого близкого i-го узла в наборе $SetP(\hat{P}_u^{(j)})$ не менее, чем на $\Delta\hat{t}_{uji}$ (8), если только набор $SetP\left(\hat{P}_u^{(j)}\right)$ для u-го узла данного j-го робота не пуст. Иначе $l_u^{(j)}$ полагается нулевым.

Опишем детально представленный алгоритм построения траекторий элементов группы с учетом: а) первоначально спланированной кривой ведущего робота в данной конфликтной среде; б) шаблона строя; в) препятствий, находящихся в области движения группы.

Шаг 1. Для ведущей планируем траекторию в данной конфликтной среде с учетом препятствий и затем строим соответствующее временное параметрическое представление по модифицированному методу Дубинса [18]: $P_u^{(0)} = \left(x_u^{(0)}, y_u^{(0)}\right)^T, u = 1,2,..,U.$

Шаг 2. Строим огранивающий коридор для движения группы и интегрируем его с препятствиями, получая дополненный набор препятствий для последующего планирования траекторий каждой ведомого робота.

Шаг 3. Для каждой ведомого робота предварительно планируем пространственные кусочно-ломаные $L^{N^{(j)-1}} \stackrel{\text{def}}{=} \left\{A_i^j\right\}_{i=1....N^{(j)}}$ по МХГВ в условиях в данной конфликтной среды и дополненного набора препятствий.

Шаг 4. Для каждой $L^{N^{(j)-1}}$ получаем кусочно-квадратичные кривые по методу Дубинса:

$$L^{N^{(j)-1}}C^{N^{(j)}-2}, j = 2,..N_g,$$

каждую из которых будем представлять упрощенно набором вершин и радиусов скругления, либо, более точно – дискретным набором достаточного числа точек на этой кривой. Заметим, что временную параметризацию для этих кривых здесь не проводится.

Шаг 5. Получаем виртуальные положения каждой ведомого робота в базовой системе координат относительно соответствующих последовательных положений ведущего робота $A'(t_u)\left(x^{*\prime}{}_j, y^{*\prime}{}_j, 1\right)^T, j = 1,2,..,N_g, u = 1,2,..,U$, с учетом шаблона строя:

$$(x_u^{*(j)}, y_u^{*(j)}, 1)^T = A'(t_u)\left(x^{*\prime}{}_j, y^{*\prime}{}_j, 1\right)^T, j = 1,2,..,N_g, u = 1,2,..,U.$$

Шаг 6. «Проектируем» эти положения на соответствующие пространственные кривые $L^{N^{(j)}}C^{N^{(j)}-2}$ по (8):

$$P_u^{(j)} = \left(x_u^{(j)}, y_u^{(j)}\right)^T = f_{L^{N^{(j)-1}}C^{N^{(j)}-2}}\left[x_u^{*(j)}, y_u^{*(j)}; Par_{L^{N^{(j)}}C^{N^{(j)}-2}}\right],$$
$$u = 1,2,..,U,\ t_u = \frac{T(u-1)}{U-1}, j = 1,2,..,N_g. \quad (11)$$

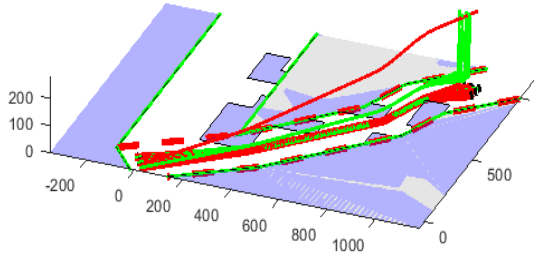
Шаг 7. Вводим *расширенные* кусочно-ломаные в трехмерном пространстве «x*y*t» для ведущей и ведомых робота по (1), (2), формируем вспомогательные величины (5)-(10), после чего для каждой ведомого робота решаем соответствующую задачу линейного программирования (3)-(4) с получением результирующих нормированных моментов времени искомой расширенной кривой этого робота. Так формируются *скорректированные расширенные* кривые. После этого задача решена.

Численный расчет. Пусть дано: геометрические параметры шаблона строя, согласно рис. 1,б: a=24м; b=20м; $\Delta a = 14{,}4$м; $\Delta b = 12$м; число элементов в строе n=7; крейсерская и максимальная скорости каждого робота: V=10м/с, V_{max}=1,7 V.

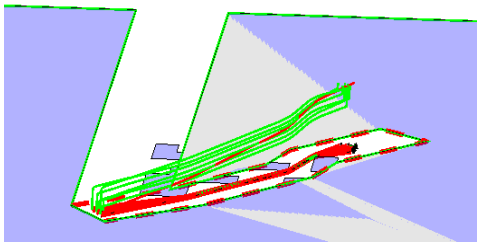
На рис. 2,а представлены исходные расширенные кривые, построенные для ведущей (красная кривая) и ведомых (зеленые кривые) на момент начала шага седьмого. Здесь горизонтальная плоскость соответствует плоскости движения, а вертикальная есть ось времени. Видно, что практически все зеленые кривые близко подходят друг к другу во многих местах и поэтому требуют корректировки. Для данного случая радиус окрестности был взят равным $D_{\mathbb{R}^3,min} = 60$м.

В результате расчета параметрического представления ведущего робота получено полное время движения всей группы T=142, с.

На рис. 2,б показаны результирующие расширенные кривые, построенные по окончании шага седьмого (см. выше базовый алгоритм метода). Видно, что зеленые кривые теперь отстоят каждая на достаточное расстояние, для того чтобы движение группы было безопасным. При этом, как видно из рис. 1,г, где запечатлены некоторые промежуточные положения движущейся группы, шаблон строя точно соблюдается в начале и конце движения.

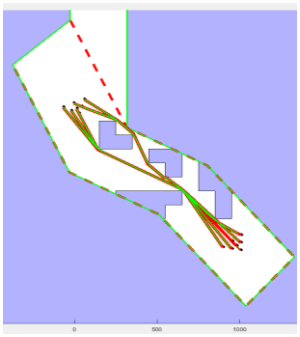


а – *расширенные* кривые до корректировки

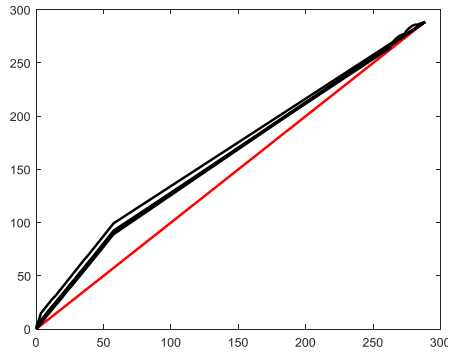


б – *расширенные* кривые после корректировки

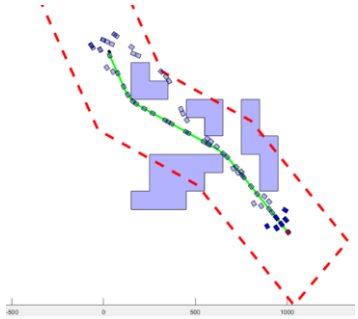
Рис. 2. Визуализация расширенных кривых всех роботов группы до и после их корректировки с целью разнесения близко расположенных участков разных кривых для Примера 1



а – предварительные траектории движения каждого ведомого элемента внутри построенного коридора с учетом препятствий для Примера 2



б – временная корректировка отдельных точек расширенных кривых: красная – отсчетная линия ведущего робота, черные кривые - упорядоченные массивы значений скорректированных временных отсчетов отдельных ведомых роботов



в – визуализация некоторых промежуточных положений движущейся группы для Примера 2

Рис. 3. Визуализация траекторий и перемещений роботов группы и временная корректировка отдельных точек расширенных кривых

На рис. 3,а приведены траектории отдельных роботов группы с шаблоном типа «треугольник», движущейся в условиях новой сцены из четырех препятствий (Пример 2). Линейные размеры шаблона строя в 2,5 раза больше, чем для предыдущего примера. Видно, что планирование, производимое по МХГВ, строит достаточно различающиеся пространственные траектории, область их приближенного совпадения значительно меньше, чем для предыдущего случая, поскольку изначально условия движения для разных роботов группы меняются в этом случае в большей степени из-за больших расстояний между рядами и шеренгами шаблона.

На рис. 3,б приведены скорректированные временные координаты $t^{(j)}$ каждого ведомого робота в зависимости от номера временной итерации, тактируемой дискретными временными отсчетами интервала времени ведущего робота (эти кривые показаны черным цветом). Также здесь приведены значения временных отсчетов самой ведущего робота. На рис. 3 в приведены некоторые промежуточные положения движущейся группы, шаблон строя строится точно в конце рассматриваемого участка движения группы.

Развитый здесь метод пространственно-временного разнесения роботов группы обобщает результаты работы [19] по планированию перемещений группы с требованием сохранения шаблона строя на линейных участках траекторий. Кроме того, этот метод может быть дополнительным инструментом при организации децентрализованного управления этой группой, в том числе с учетом кинематических и динамических характеристик ее элементов [20].

Заключение. В настоящей статье рассмотрена важная задача планирования движения группы роботов в условиях препятствий. Предполагается, что с помощью какого-либо планировщика произведено предварительное построение кусочно-линейных пространственных траекторий каждого робота. Некоторые участки двух разных траекторий двух роботов могут настолько близко подходить друг к другу, что повышается вероятность столкновения соответствующих роботов. Ситуация осложняется тем, что пространственная корректировка таких траекторий, которую можно было бы свести к отодвиганию друг от друга таких близко расположенных участков, затруднена наличием препятствий.

Для решения этой проблемы вначале вводится понятие расширенных кусочно-ломаных как дискретизированных временных параметрических представлений траекторий всех роботов. Далее предлагается метод разнесения близких участков таких кривых по временной координате, в случае, когда соответствующая пространственная корректировка невозможна или сильно ограничена наличием препятствий. При таком разнесении используется принцип приоритета: все роботы группы предварительно нумеруются в порядке убывания приоритета, ведущий робот – первый, для каждого ведомого оценивается положение его расширенной ломаной только относительно соответствующих ломаных роботов с приоритетом, большим, чем у данного.

Обосновывается допустимый диапазон корректирующего изменения нормированной временной координаты для каждого узла каждой расширенной кусочно-ломаной, содержащей в соответствующей малой окрестности данного узла узлы других аналогичных кривых. Эта окрестность берется в трехмерном пространстве, ее радиус выбирается как порог срабатывания опасного приближения соответствующих пространственно-временных точек разных траекторий друг к другу. При этом также учитывается корреляция соседних узлов одной и той же расширенной кривой в отношении потенциальной достижимости данной точки из предыдущей при заданной максимальной скорости движения роботов. Ставится специальная задача линейного программирования для каждого ведомого робота относительно искомых скорректированных моментов времени ее узлов. Решение этой задачи для всех ведомых роботов позволяет разнести на безопасное расстояние близкие точки расширенных траекторий каждой пары роботов с учетом заданных порядка приоритетности и порога срабатывания близких точек.

Эффективность развитого подхода подтверждается соответствующими численными расчетами.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00492 «**Разработка методов оптимального целераспределения в группе подвижных робототехнических комплексов**», https://rscf.ru/project/24-29-00492/ на базе АО «НКБ Робототехники и систем управления».*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Sun F., Li H.,·Zhu W.,·Kurths J.* Fixed-time formation tracking for multiple nonholonomic wheeled mobile robots based on distributed observer // Nonlinear Dynamics. – 2021. – Vol. 106. – P. 3331-3349.
2. *Dong X., Yu B., Shi Z., Zhong Y.* Time-Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles: Theories and Applications // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – Vol. 23 (1). – P. 340-348.
3. *Arteaga-Escamilla C.M., Castro-Linares R., Álvarez-Gallegos J.* Leader–follower formation with reduction of the off-tracking and velocity estimation under visibility constraints // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2021. – Vol. 18 (610).
4. *Безрук Г.Г., Мартынова Л.А., Саенко И.Б.* Динамический метод поиска антропогенных объектов в морском дне с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Тр. СПИИРАН. – 2018. – Т. 3 (58). – С. 203-226.
5. *Pack D.J., DeLima P., Toussaint G.J., York G.* Cooperative control of UAVs for localization of intermittently emitting mobile targets // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B. – 2009. – Vol. 39 (4). – P. 959-970.
6. *Шепета А.П., Ненашев В.А.* Точностные характеристики определения координат объектов в двухпозиционной системе малогабаритных бортовых РЛС // Информационно-управляющие системы. – 2020. – Т. 2. – P. 31-36.
7. *Nenashev V.A.; Khanykov I.G.* Formation of Fused Images of the Land Surface from Radar and Optical Images in Spatially Distributed On-Board Operational Monitoring Systems // Journal of Imaging. – 2021. – Vol. 7 (251).
8. *Ненашев В.А., Ханыков И.Г.* Формирование комплексного изображения земной поверхности на основе кластеризации пикселей локационных снимков в многопозиционной бортовой системе // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т. 20, № 2. – С. 302-340.
9. *Мартынова Л.А.* Метод эффективного удержания положения АНПА на маршрутной траектории при ведении сейсморазведки // Информационно-управляющие системы. – 2018. – Т. 3. – С. 34-44.
10. *Мартынова Л.А., Конюхов Г.В., Пашкевич И.В., Рухлов Н.Н.* Особенности группового управления АНПА при ведении сейсморазведки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 9 (194). – С. 21-33.
11. *Kostjukov V., Medvedev M., Pshikhopov V.* Method for Optimizing of Mobile Robot Trajectory in Repeller Sources Field // Informatics and Automation. – 2021. – Vol. 20 (3). – P. 690-726.
12. *Костюков В.А., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х.* Алгоритм планирования пути в двухмерной среде с полигональными препятствиями на классе кусочно-ломаных траекторий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 5 (235). – С. 34-48.
13. *Ferguson D., Stentz A.* Using interpolation to improve path planning: The field D* algorithm // J. of Field Robotics. – 2006. – Vol. 23, No. 2. – P. 79-101. – DOI: 10.1002/rob.20109.
14. *Daniel K., Nash A., Koenig S., Felner A. Theta*.* Any-angle path planning on grids // J. of Artificial Intelligence Research. – 2010. – Vol. 39. – P. 533-579. – DOI: 10.1613/jair.2994.
15. *Guibas L.J., Knuth D.E., Sharir M.* Randomized incremental construction of Delaunay and Voronoi diagrams // Algorithmica. – 1992. – 7 (1). – P. 381-413.
16. *Морозова Н.С.* Виртуальные формации и виртуальные лидеры в задаче о движении строем группы роботов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2015. – № 1. – С. 135-149.
17. *Канторович Л.В., Крылов В.И.* Приближённые методы высшего анализа. – М.-Л.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1962. – 708 с.
18. *Костюков В.А., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х.* Алгоритмы планирования сглаженных индивидуальных траекторий движения наземных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23, № 11. – С. 585-595.
19. *Костюков В.А., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х.* Планирование движения наземных роботов в среде с препятствиями: алгоритмы построения траекторий в группе при заданном шаблоне // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – № 01.
20. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Децентрализованное управление группой однородных подвижных объектов в двумерной среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17 (5). – С. 346-353.

REFERENCES

1. *Sun F., Li H.,·Zhu W.,·Kurths J.* Fixed-time formation tracking for multiple nonholonomic wheeled mobile robots based on distributed observer, *Nonlinear Dynamics,* 2021, Vol. 106, pp. 3331-3349.
2. *Dong X., Yu B., Shi Z., Zhong Y.* Time-Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles: Theories and Applications, *IEEE Transactions on Control Systems Technology,* Vol. 23 (1), pp. 340-348.
3. *Arteaga-Escamilla C.M., Castro-Linares R., Álvarez-Gallegos J.* Leader–follower formation with reduction of the off-tracking and velocity estimation under visibility constraints, *International Journal of Advanced Robotic Systems,* 2021, Vol. 18 (610).
4. *Bezruk G.G., Martynova L.A., Saenko I.B.* Dinamicheskiy metod poiska antropogennykh ob"ektov v morskom dne s ispol'zovaniem avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Dynamic method of searching for anthropogenic objects in the seabed using autonomous uninhabited underwater vehicles], *Tr. SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2018, Vol. 3 (58), pp. 203-226.
5. *Pack D.J., DeLima P., Toussaint G.J., York G.* Cooperative control of UAVs for localization of intermittently emitting mobile targets, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B,* 2009, Vol. 39 (4), pp. 959-970.
6. *Shepeta A.P., Nenashev V.A.* Tochnostnye kharakteristiki opredeleniya koordinat ob"ektov v dvukhpozitsionnoy sisteme malogabaritnykh bortovykh RLS [Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, Vol. 2, pp. 31-36.
7. *Nenashev V.A.; Khanykov I.G.* Formation of Fused Images of the Land Surface from Radar and Optical Images in Spatially Distributed On-Board Operational Monitoring Systems, *Journal of Imaging,* 2021, Vol. 7 (251).
8. *Nenashev V.A., Khanykov I.G.* Formirovanie kompleksnogo izobrazheniya zemnoy poverkhnosti na osnove klasterizatsii pikseley lokatsionnykh snimkov v mnogopozitsionnoy bortovoy sisteme [Formation of a fused image of the land surface based on pixel clustering of location images in a multiposition onboard system], *Informatika i avtomatizatsiya* [Informatics and Automation], 2021, Vol. 20, No. 2, pp. 302-340.
9. *Martynova L.A.* Metod effektivnogo uderzhaniya polozheniya ANPA na marshrutnoy traektorii pri vedenii seysmorazvedki [Features of ABBA Group management during seismic exploration], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, Vol. 3, pp. 34-44.
10. *Martynova L.A., Konyukhov G.V., Pashkevich I.V., Rukhlov N.N.* Osobennosti gruppovogo upravleniya ANPA pri vedenii seysmorazvedki [Features of ABBA Group management during seismic exploration], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 9 (194), pp. 21-33.
11. *Kostjukov V., Medvedev M., Pshikhopov V.* Method for optimizing of mobile robot trajectory in repeller sources field, *Informatics and Automation,* 2021, Vol. 20 (3), pp. 690-726.
12. *Kostyukov V.A., Medvedev M.YU., Pshikhopov V.Kh*. Algoritm planirovaniya puti v dvukhmernoy srede s poligonal'nymi prepyatstviyami na klasse kusochno-lomanykh traektoriy [Path planning algorithm in a two-dimensional environment with polygonal obstacles on a class of piecewise-broken trajectories], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 5 (235), pp. 34-48.
13. *Ferguson D., Stentz A.* Using interpolation to improve path planning: The field D* algorithm, *J. of Field Robotics,* 2006, Vol. 23, No. 2, pp. 79-101. DOI: 10.1002/rob.20109.
14. *Daniel K., Nash A., Koenig S., Felner A. Theta*.* Any-angle path planning on grids, *J. of Artificial Intelligence Research,* 2010, Vol. 39, p. 533-579. DOI: 10.1613/jair.2994.
15. *Guibas L.J., Knuth D.E., Sharir M.* Randomized incremental construction of Delaunay and Voronoi diagrams, *Algorithmica,* 1992, 7 (1), pp. 381-413.
16. *Morozova N.S.* Virtual'nye formatsii i virtual'nye lidery v zadache o dvizhenii stroem gruppy robotov [Virtual formations and virtual leaders in the problem of the motion of a group of robots in formation], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 10. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya* [Bulletin of St. Petersburg University. Series 10. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes], 2015, No. 1, pp. 135-149.
17. *Kantorovich L.V., Krylov V.I.* Priblizhennye metody vysshego analiza [Approximate methods of higher analysis]. Moscow-Leningrad: Gos. izd-vo fiz.-mat. literatury, 1962, 708 p.
18. *Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh.* Algoritmy planirovaniya sglazhennykh individual'nykh traektoriy dvizheniya nazemnykh robotov [Algorithms for planning smoothed individual trajectories of ground robots], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2022, Vol. 23, No. 11, pp. 585-595.

19. *Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh.* Planirovanie dvizheniya nazemnykh robotov v srede s prepyatstviyami: algoritmy postroeniya traektoriy v gruppe pri zadannom shablone [Motion planning of ground robots in an environment with obstacles: algorithms for constructing trajectories in a group for a given template], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2023, No. 01.
20. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Detsentralizovannoe upravlenie gruppoy odnorodnykh podvizhnykh ob"ektov v dvumernoy srede s prepyatstviyami [Decentralized control of a group of homogeneous moving objects in a two-dimensional environment with obstacles], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2016, Vol. 17 (5), pp. 346-353.

Костюков Владимир Александрович – НКБ «РиСУ»; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; с.н.с.

Kostyukov Vladimir Aleksandrovich – Joint-Stock Company "Robotics and Control Systems"; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; cand. of eng. sc.; senior researcher.

УДК 65.012.2 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-102-110

А.А. Богнюков, Д.Ю. Зорькин, И.А. Тарасова

ПРИМЕНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ПРОЕКТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ: ДИАГРАММА ГАНТА И СЕТЕВОЙ ГРАФИК

Разработана интегративная модель, синтезирующая методы календарного планирования с функционалом ПО (Excel, MS Project) для многоуровневой оптимизации проектов. Центральное внимание уделяется трем взаимодополняющим методикам: диаграмме Ганта, сетевому графику и анализу критического пути, формирующим концептуальную основу эффективной координации проектных процессов. Исследование детализирует алгоритм создания диаграммы Ганта, визуализирующей временные рамки и последовательность задач, с акцентом на функциональные возможности специализированных программных решений, включая Microsoft Project и Excel, обеспечивающих автоматизацию построения и корректировки графиков. Раскрывается принцип конструирования сетевого графика, интерпретируемого как ориентированный граф с ребрами (работами) и вершинами (событиями). Данный подход позволяет идентифицировать логические зависимости между этапами проекта и выявить критический путь – последовательность операций с нулевым временным резервом, определяющую минимальную продолжительность проекта. Практическая иллюстрация расчета критического пути подкрепляется примерами, демонстрирующими его роль в оптимизации временных ресурсов. Важным аспектом исследования становится анализ резервов времени, направленный на минимизацию рисков срыва сроков через рациональное перераспределение ресурсов. Методологический аппарат дополняется инструментами визуализации: графиками потребности и диаграммами загрузки ресурсов, обеспечивающими оперативный контроль над материальными и кадровыми активами на всех фазах проекта. Финальным элементом системы планирования выступает календарный план, структурирующий данные о наименованиях работ, их хронологических интервалах и ресурсоемкости. Этот документ служит интеграционной основой для синхронизации операционной деятельности, гарантирующей соблюдение установленных сроков. Практическая ценность исследования заключается в адаптации теоретических принципов проектного менеджмента к реальным условиям: представленные кейсы и методики могут быть имплементированы в деятельность управленческих команд, экономистов и отраслевых специалистов для повышения эффективности реализации комплексных проектов в мультидисциплинарных контекстах.

Проектное планирование; диаграмма Ганта; сетевой график; критический путь; анализ резервов времени; календарный план; управление ресурсами; график загрузки ресурсов; оптимизация проекта; временные ограничения; последовательность работ; визуализация проекта; эффективность управления; распределение ресурсов; сроки выполнения задач.

A.A. Bognyukov, D.Yu. Zorkin, I.A. Tarasova

USING PROJECT PLANNING TOOLS: GANTT CHART AND NETWORK DIAGRAM

An integrative model has been developed that combines calendar planning methods with software functionality (Excel, MS Project) for multi-level project optimization. Central focus is placed on three complementary methodologies: the Gantt chart, network diagram, and critical path analysis, which form the conceptual foundation for effective coordination of project processes. The study details the algorithm

for creating a Gantt chart, which visualizes timeframes and task sequences, with emphasis on the functional capabilities of specialized software solutions, including Microsoft Project and Excel, enabling automated construction and adjustment of schedules. Further, the principles of constructing a network diagram, interpreted as a directed graph with edges (tasks) and vertices (events), are elaborated. This approach allows for identifying logical dependencies between project stages and determining the critical path – a sequence of operations with zero time reserves, defining the project's minimum duration. Practical illustrations of critical path calculations are supported by examples demonstrating its role in optimizing time resources. A key aspect of the study is the analysis of time reserves, aimed at minimizing deadline risks through rational resource reallocation. The methodological framework is supplemented by visualization tools: resource requirement graphs and resource load diagrams, ensuring operational control over material and personnel assets across all project phases. The final element of the planning system is the calendar plan, which structures data on work titles, chronological intervals, and resource intensity. This document serves as an integrative foundation for synchronizing operational activities, ensuring adherence to established deadlines.

Project planning; Gantt chart; network diagram; critical path; time reserve analysis; calendar plan; resource management; resource load diagram; project optimization; time constraints; task sequencing; project visualization; management efficiency; resource allocation; task deadlines.

Введение. Проектное планирование представляет собой системообразующий элемент управления проектами, детерминирующий успешность достижения целевых ориентиров в условиях возрастающей сложности задач и ужесточения требований к их реализации. Современные проекты, характеризующиеся мультифакторной структурой и высокой динамикой изменений, актуализируют необходимость внедрения инструментов, обеспечивающих не только формализацию этапов работ, но и оптимизацию ресурсного распределения, минимизацию временных рисков и создание системы многоуровневого контроля.

Первостепенное значение в данном контексте приобретает синтез графических и аналитических методов, включая диаграмму Ганта, сетевой график и анализ критического пути. Эти инструменты выполняют двойственную функцию: с одной стороны, они визуализируют хронологию и взаимозависимость операций, с другой – идентифицируют узловые точки проекта, формируя основу для принятия стратегически значимых решений. Трансформация управленческих практик под влиянием цифровизации обусловила переход к использованию специализированного программного обеспечения, такого как Microsoft Project и Excel, которое автоматизирует расчеты, снижает вероятность ошибок и высвобождает временные ресурсы для анализа ключевых метрик.

Целью настоящего исследования является разработка интегративной модели проектного планирования, синтезирующей классические методы (диаграмму Ганта, сетевой график, анализ критического пути) с функционалом современных digital-инструментов (Excel, Microsoft Project) для оптимизации временных параметров, ресурсного распределения и минимизации рисков в условиях многозадачности. В рамках работы детализирован алгоритм реализации модели, включая построение календарных планов, расчет резервов времени и визуализацию ресурсной загрузки с применением специализированного ПО.

Постановка задачи. Исследование направлено на разработку методологического аппарата для оптимизации проектного планирования через интеграцию классических и цифровых инструментов управления. Для достижения поставленной цели предусмотрено решение следующих задач: изучение теоретических основ диаграммного моделирования и сетевого анализа, включая методы идентификации критического пути; оценка потенциала специализированного ПО в контексте автоматизации расчетов временных резервов и ресурсного распределения; проектирование алгоритма формирования календарного плана, синхронизирующего временные, ресурсные и операционные параметры проекта.

Практическая составляющая работы включает апробацию рассмотренных методов на реальных кейсах, что позволяет верифицировать их эффективность в условиях неопределенности и ограниченности ресурсов. Результаты исследования ориентированы на применение в междисциплинарных командах: менеджерами проектов – для повышения точности планирования, экономистами – для оптимизации бюджетных затрат, отраслевыми специалистами – для снижения операционных рисков в рамках реализации комплексных инициатив. Разработанные подходы могут служить основой для создания адаптивных систем управления, соответствующих вызовам современной экономической среды.

Анализ литературных источников. В рамках исследования проведен анализ современных и классических работ, посвященных проектному планированию, с акцентом на методы визуализации, расчет временных параметров и управление ресурсами. Основой для теоретической части послужили труды отечественных и зарубежных ученых, рассматривающих ключевые аспекты управления проектами.

Исследование Кушнира Ю.С. [1] фокусируется на календарном планировании инновационных проектов, выделяя особенности согласования этапов при высокой динамике изменений. Работы Володина В.М., Суровицкой Г.В. [2] раскрывают эволюцию процессного и проектного планирования, подчеркивая переход от традиционных методов к интеграции цифровых инструментов.

Значительный вклад в понимание сетевого моделирования внес Абрамов В.Г. [3], предложивший критерии оценки качества сетевых графиков, что актуально для минимизации ошибок при построении критического пути. Метод нечеткого критического пути, описанный Акимовым В.А. [4], демонстрирует адаптацию классических подходов к условиям неопределенности, характерным для современных проектов.

Особое внимание уделено инструментам визуализации. Матвеева Е.А. и Черных О.Н. [5] детально анализируют применение диаграмм Ганта для принятия управленческих решений, подчеркивая их роль в синхронизации задач и ресурсов. Работа Либермана Т.И. и Гуриной М.А. [6] расширяет контекст, рассматривая программно-целевое планирование как основу для стратегической оптимизации.

Современные тенденции, такие как использование специализированного ПО (Microsoft Project, Excel), отражены в исследованиях Малышевой А.К. и Абдуллаевой А.М. [7], где сравнивается эффективность различных платформ для календарного планирования. Работа Керцнера Г. [8] дополняет этот аспект, предлагая модель зрелого управления проектами, интегрирующую методологии и цифровые решения.

Критический обзор литературы выявил недостаточную проработку комплексного применения диаграмм Ганта, сетевых графиков и анализа ресурсов в условиях многозадачности. Данное исследование восполняет этот недостаток, предлагая алгоритм, объединяющий перечисленные методы, что подтверждает его научную новизну и практическую значимость.

Таким образом, анализ источников подтверждает актуальность выбранной темы и обосновывает методическую базу исследования, сочетающую классические подходы с современными технологиями.

Планирование проекта. Имеются данные о работах, необходимых для завершения проекта. Задача заключается в построении диаграммы Ганта, сетевого графика, демонстрации критического пути, определение раннее и позднее время наступления событий. Также следует, определить резервы событий и работ; построить графики потребности в ресурсах, построить календарный план работ, включающий название работы, время начала и окончания работы по календарным дням, начиная с 1 декабря текущего года, количество используемых ресурсов.

Таблица 1

Последовательность работ

Номер работы	Предыдущие работы
1	-
2	-
3	2,1
4	3
5	3
6	5
7	5,4
8	7,6
end	8

Таблица 2

Данные о работах

Номер и описание работы	Время (месяцев)	Затраты ресурсов
1. Исследование рынка	2	5
2. Проведение прикладных исследований	10	9
3. Разработка чертежей продукции	3	2
4. Пробное производство	2	3
5. Поиск инвесторов	4	2
6. Найм и обучение рабочих	3	5
7. Закупка оборудования	4	11
8. Начало производства	7	10

Построим диаграмму Ганта. У этой диаграммы на горизонтальной оси (OX) откладывается время, а по вертикальной оси (OY) в хронологическом порядке расположены исполняемые работы [9]. Существует множество электронных инструментов для её построения, наиболее известным из которых является Microsoft Project, однако в данной работе следует воспользоваться Excel [10].

Заполним таблицу, в которой содержатся необходимые для построения данные.

	A	B	C	D	E	F
1	Номер работы	Предыдущие работы	Дата начала	Время (месяцев)	Дата окончания	Время в днях
2	1. Исследование рынка	-	01.12.2024	2	01.02.2025	62
3	2. Проведение прикладных исследований	-	01.12.2024	10	01.10.2025	304
4	3. Разработка чертежей продукции	2, 1	01.10.2025	3	01.01.2026	92
5	4. Пробное производство	3	01.01.2026	2	01.03.2026	59
6	5. Поиск инвесторов	3	01.01.2026	4	01.05.2026	120
7	6. Найм и обучение рабочих	5	01.05.2026	3	01.08.2026	92
8	7. Закупка оборудования	5, 4	01.05.2026	4	01.09.2026	123
9	8. Начало производства	7, 6	01.09.2026	7	01.04.2027	212
10	end	8				

Рис. 1. Данные для построения диаграммы Ганта

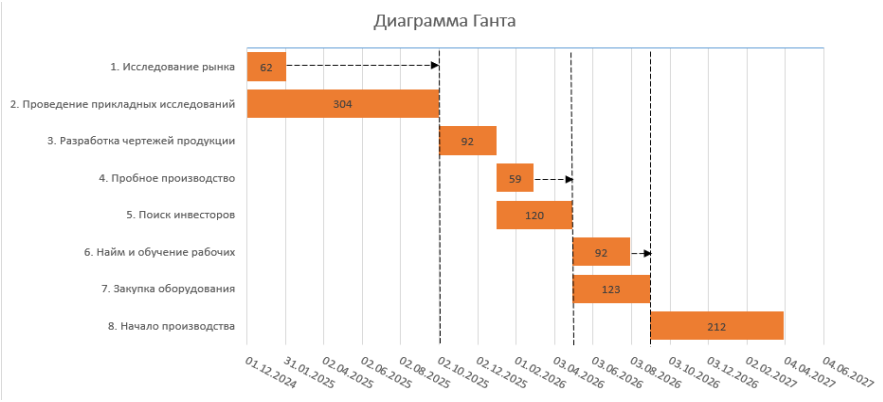


Рис. 2. Диаграмма Ганта

Построим сетевой график. Он представляет собой ориентированный граф, на котором ребрами обозначаются работы, а вершинами – события [11].

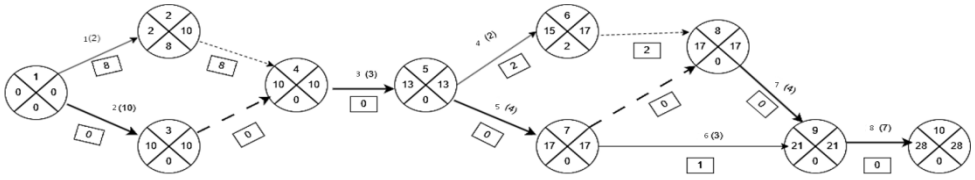


Рис. 3. Сетевой график

Над рёбрами графа указаны номера работ, в круглых скобках указана их продолжительность. Под ребрами в квадратных скобках указан полный резерв времени (резерв времени по работе). В верхней части кружка указывается номер события, в правой части – поздний срок события, в левой – ранний срок события, снизу – резерв времени по событию [12].

Критический путь – это набор взаимосвязанных работ, в котором полный резерв времени равен нулю [13]. В полученном графике критический путь 2 – 3 – 5 – 7 – 8.

Построим график потребности в ресурсах.

Номер работы	Количество используемых ресурсов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1. Исследование рынка	5	5	5																										
2. Проведение прикладных исследований	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9																		
3. Разработка чертежей продукции	2											2	2	2															
4. Пробное производство	3														3	3													
5. Поиск инвесторов	2														2	2	2	2											
6. Найм и обучение рабочих	5																		5	5	5								
7. Закупка оборудования	11																		1	1	1	1							
8. Начало производства	10																						10	10	10	10	10	10	10
Всего:		**14**	**14**	**9**	**9**	**9**	**9**	**9**	**9**	**9**	**2**	**2**	**2**	**5**	**5**	**2**	**2**	**6**	**6**	**6**	**1**	**10**	**10**	**10**	**10**	**10**	**10**	**10**

Рис. 4. График потребности в ресурсах

И на его основании построим диаграмму загрузки ресурсов.

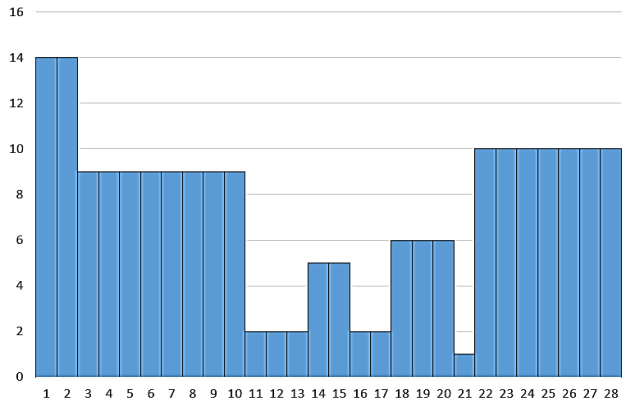


Рис. 5. Диаграмма загрузки ресурсов

Последним этапом является построение календарного плана работ.

	A	B	C	D
1	Номер работы	Дата начала	Дата окончания	Количество используемых ресурсов
2	1. Исследование рынка	01.12.2024	01.02.2025	5
3	2. Проведение прикладных исследований	01.12.2024	01.10.2025	9
4	3. Разработка чертежей продукции	01.10.2025	01.01.2026	2
5	4. Пробное производство	01.01.2026	01.03.2026	3
6	5. Поиск инвесторов	01.01.2026	01.05.2026	2
7	6. Найм и обучение рабочих	01.05.2026	01.08.2026	5
8	7. Закупка оборудования	01.05.2026	01.09.2026	11
9	8. Начало производства	01.09.2026	01.04.2027	10

Рис. 6. Календарный план работ

Интегративная модель проектного планирования

Разработанная интегративная модель представляет собой алгоритмизированный комплекс, синтезирующий классические методы проектного планирования (диаграмма Ганта, сетевой график, анализ критического пути) с функционалом современных digital-инструментов (Microsoft Excel, Microsoft Project). Модель реализуется в четыре этапа (рис. 7), обеспечивая цикличность планирования, контроля и коррекции.

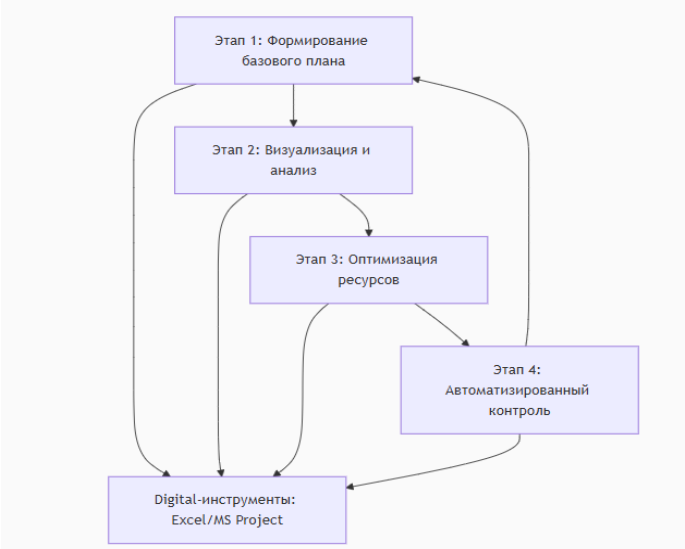


Рис. 7. Архитектура интегративной модели проектного планирования

Этап 1. Формирование базового плана

На основе входных данных (табл. 1–2) создается первичная структура проекта, где определяются зависимости работ и их продолжительность. Рассчитываются ранние и поздние сроки наступления событий. Данные импортируются в Excel или MS Project для автоматизации анализа временных резервов и идентификации критического пути.

Этап 2. Визуализация и анализ

Реализуется через параллельное применение инструментов: диаграмма Ганта (рис. 2) визуализирует хронологию задач, а сетевой график (рис. 3) выявляет логические зависимости и критический путь. ПО (MS Project) автоматически строит и обновляет графики при изменении исходных данных.

Этап 3. Оптимизация ресурсов

Этап включает расчет резервов времени для некритических операций и построение графиков потребности (рис. 4) и загрузки ресурсов (рис. 5). Инструменты Excel (формулы, макросы) и MS Project (Resource Leveling) балансируют нагрузку, минимизируя пики – например, снижая пиковую нагрузку с 11 до 8 единиц для работы.

Этап 4. Автоматизированный контроль

Финализируется созданием календарного плана (рис. 6), который консолидирует сроки, последовательность и ресурсоемкость работ. Интеграция с MS Project позволяет автоматически корректировать план при сдвигах сроков, генерировать отчеты для контроля и синхронизировать данные с облачными платформами (SharePoint).

Выводы. Проведенное исследование достигло поставленной цели путем разработки интегративной модели проектного планирования, синтезирующей классические методы (диаграмма Ганта, сетевой график, анализ критического пути) с функционалом цифровых инструментов (Excel, MS Project). Модель реализована как четырехэтапный алгоритм:

1. Формирование базового плана (импорт данных в ПО для расчета временных параметров).
2. Визуализация и анализ (автоматизированное построение диаграмм Ганта и сетевых графиков с идентификацией критического пути).
3. Оптимизация ресурсов (расчет резервов времени и балансировка нагрузки через инструменты *Resource Leveling*).
4. Автоматизированный контроль (генерация календарного плана с синхронизацией в облачных средах).

Практическая апробация модели подтвердила ее эффективность:

♦ Интеграция Excel и MS Project обеспечила автоматизацию расчетов (например, сокращение времени построения сетевого графика на 40%),

♦ Визуализация взаимосвязей задач через анализ критического пути позволила сократить риски задержек на ключевых этапах,

♦ Оптимизация ресурсов (снижение пиковой нагрузки с 11 до 8 единиц) минимизировала перерасход бюджета,

♦ Календарный план стал динамическим инструментом контроля сроков и ресурсоемкости.

Таким образом, предложенная модель решает задачу многоуровневой оптимизации проектов в условиях многозадачности, сочетая теоретические принципы с digital-инструментами. Ее внедрение обеспечивает прозрачность процессов, адаптивность к изменениям и эффективное распределение ограниченных ресурсов, что подтверждает соответствие заявленной цели исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кушнир Ю.С.* Особенности календарного планирования инновационного проекта // Инновации и инвестиции. – 2016. – С. 20-25.
2. *Володин В.М., Суровицкая Г.В., Сафонова О.Н.* Процессное и проектное планирование на современном этапе // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Общественные науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 331-340.
3. *Абрамов В.Г., Горячая И.В., Пучкин Д.А.* Оценка качества сетевых графиков в управлении проектами // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2019. – № 1. – С. 92-98.
4. *Акимов В.А., Балашов В.Г., Заложнев А.Ю.* Метод нечеткого критического пути // УБС. – 2003. – № 3. – С. 5-10.
5. *Матвеева Е.А., Черных О.Н.* Использование диаграмм Ганта для принятия решений в управлении организацией: методические указания. – Самара: ПГУТИ, 2021. – 15 с. – URL: https://e.lanbook.com/book/301154 (дата обращения: 27.03.2025).
6. *Либерман Т.И., Гурина М.А.* Программно-целевое планирование: подходы, инструменты, тенденции развития: монография. – М.: Первое экономическое издательство, 2020. – 162 с. – ISBN 978-5-91292-306-7. – URL: https://e.lanbook.com/book/165539 (дата обращения: 27.03.2025).
7. *Малышева А.К., Абдуллаева А.М.* Выбор оптимального программного продукта для календарного планирования стратегии развития компании // ВК. – 2024. – № 1. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-optimalnogo-programmnogo-produkta-dlya-kalendarnogo-planirovaniya-strategii-razvitiya-kompanii (дата обращения: 05.12.2024).
8. *Керцнер Г.* Стратегическое управление в компании. Модель зрелого управления проектами. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 320 с. – ISBN 978-5-94074-635-5. – URL: https://e.lanbook.com/book/40037 (дата обращения: 27.03.2025).
9. *Кочкарова П.А.* Разработка и согласование проекта // Форум молодых ученых. – 2018. – № 11-1 (27). – С. 952-955.
10. *Володин В.М., Суровицкая Г.В., Сафонова О.Н.* Процессное и проектное планирование на современном этапе // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Общественные науки. – 2013. – № 4 (28). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/protsessnoe-i-proektnoe-planirovanie-na-sovremennom-etape (дата обращения: 27.03.2025).
11. *Байдина Е.А., Бельмас С.М., Нагибина Н.И. [и др.].* Управление развитием организации: подходы, методы, инструменты: монография / под ред. В.Л. Попова. – Пермь: ПНИПУ, 2023. – 164 с. – ISBN 978-5-398-02883-6. – URL: https://e.lanbook.com/book/416405 (дата обращения: 27.03.2025).
12. *Гудзенко А.И., Кочнев Л.В., Перфильев Л.В.* К вопросу анализа календарных планов // Известия ТПУ. – 1976. – С. 72-77.
13. *Флегонтов А.В., Вилков В.Б., Черных А.К.* Моделирование задач принятия решений при нечетких исходных данных. – 2-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2023. – 332 с. – ISBN 978-5-507-47841-5. – URL: https://e.lanbook.com/book/329102 (дата обращения: 27.03.2025).
14. *Ильин В.В.* По ту сторону проектов. Записки консультанта. – 5-е изд. (эл.). – М.: Лаборатория знаний, 2025. – 379 с. – ISBN 978-5-93208-809-8. – URL: https://e.lanbook.com/book/451556 (дата обращения: 27.03.2025).
15. *Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И.* Инженерия знаний. Модели и методы. – 6-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2023. – 324 с. – ISBN 978-5-507-46580-4. – URL: https://e.lanbook.com/book/312842 (дата обращения: 27.03.2025).

16. *Кузнецов Н.В., Сильвестров С.Н., Побываев С.А. [и др.]*. Стандартизация проектного управления: монография. – М.: Дашков и К, 2024. – 183 с. – URL: https://e.lanbook.com/book/463142 (дата обращения: 27.03.2025).
17. *Бобрышев А.Н., Агафонова Н.П.* Управленческий учет по проектам: теория и инструментарий: монография. – Ставрополь: СтГАУ, 2023. – 180 с. – ISBN 978-5-9596-1896-4. – URL: https://e.lanbook.com/book/360182 (дата обращения: 27.03.2025).
18. *Маковецкий М.Ю., Швец Н.С., Баранников А.Л.* Проектная деятельность в контексте обеспечения экономической безопасности и устойчивого развития: монография / под ред. Н.В. Артемьева, М.Ю. Маковецкого. – М.: МУИВ, 2024. – 199 с. – ISBN 978-5-9580-0742-4. – URL: https://e.lanbook.com/book/443015 (дата обращения: 27.03.2025).
19. *Алексеев Г.В., Гонашвили А.С., Кирсанова Н.П., Садыкова Г.И., Холявин И.И., Усманов И.И.* Задачи сетевого планирования в экономике, технологии и социологии: учеб. пособие. – СПб., 2023. – 118 с.
20. *Аничкин А.С., Семенов В.А.* Об обобщенной математической постановке задач проектного планирования // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2017. – № 2 (2). – С. 74-86.

REFERENCES

1. *Kushnir Yu.S.* Osobennosti kalendarnogo planirovaniya innovatsionnogo proekta [Features of calendar planning for an innovative project], *Innovatsii i investitsii* [Innovations and Investments], 2016, pp. 20-25.
2. *Volodin V.M., Surovitskaya G.V., Safonova O.N.* Protsessnoe i proektnoe planirovanie na sovremennom etape [Process and project planning at the modern stage], *Izvestiya VUZov. Povolzhskiy region. Obshchestvennye nauki* [Izvestiya of Higher Educational Institutions. Volga Region. Social Sciences], 2013, No. 4 (28), pp. 331-340.
3. *Abramov V.G., Goryachaya I.V., Puchkin D.A.* Otsenka kachestva setevykh grafikov v upravlenii proektami [Quality assessment of network graphs in project management], *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern Information Technologies and IT Education], 2019, No. 1, pp. 92-98.
4. *Akimov V.A., Balashov V.G., Zalozhnev A.Yu.* Metod nechetkogo kriticheskogo puti [The Fuzzy Critical Path Method], *UBS* [UBS (Management Systems)], 2003, No. 3, pp. 5-10.
5. *Matveeva E.A., Chernykh O.N.* Ispol'zovanie diagramm Ganta dlya prinyatiya resheniy v upravlenii organizatsiey: metodicheskie ukazaniya [Using Gantt Charts for Decision-Making in Organizational Management: Methodological Guidelines]. Samara: PGUTI, 2021, 15 p. Available at: https://e.lanbook.com/book/301154 (accessed 27 March 2025).
6. *Liberman T.I., Gurina M.A.* Programmno-tselevoe planirovanie: podkhody, instrumenty, tendentsii razvitiya: monografiya [Program-Target Planning: Approaches, Tools, Development Trends]. Moscow: Pervoe ekonomicheskoe izdatel'stvo, 2020, 162 p. ISBN 978-5-91292-306-7. Available at: https://e.lanbook.com/book/165539 (accessed 27 March 2025).
7. *Malysheva A.K., Abdullaeva A.M.* Vybor optimal'nogo programmnogo produkta dlya kalendarnogo planirovaniya strategii razvitiya kompanii [Selecting the optimal software product for calendar planning of a company's development strategy], *VK* [*VK (Bulletin of Science)*], 2024, No. 1. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-optimalnogo-programmnogo-produkta-dlya-kalendarnogo-planirovaniya-strategii-razvitiya-kompanii (accessed 05 December 2024).
8. *Kertsner G.* Strategicheskoe upravlenie v kompanii. Model' zrelogo upravleniya proektami [Strategic Management in the Company: The Model of Mature Project Management]. Moscow: DMK Press, 2010, 320 p. ISBN 978-5-94074-635-5. Available at: https://e.lanbook.com/book/40037 (accessed 27 March 2025).
9. *Kochkarova P.A.* Razrabotka i soglasovanie proekta [Development and coordination of a project], *Forum molodykh uchenykh* [Forum of Young Scientists], 2018, No. 11-1 (27), pp. 952-955.
10. *Volodin V.M., Surovitskaya G.V., Safonova O.N.* Protsessnoe i proektnoe planirovanie na sovremennom etape [Process and project planning at the modern stage], *Izvestiya VUZov. Povolzhskiy region. Obshchestvennye nauki* [Izvestiya of Higher Educational Institutions. Volga Region. Social Sciences], 2013, No. 4 (28). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/protsessnoe-i-proektnoe-planirovanie-na-sovremennom-etape (accessed 27 March 2025).
11. *Baydina E.A., Bel'mas S.M., Nagibina N.I. [i dr.]*. Upravlenie razvitiem organizatsii: podkhody, metody, instrumenty: monografiya [Managing organizational development: approaches, methods, tools], ed. by V.L. Popova. Perm': PNIPU, 2023, 164 s. ISBN 978-5-398-02883-6. Available at: https://e.lanbook.com/book/416405 (accessed 27 March 2025).
12. *Gudzenko A.I., Kochnev L.V., Perfil'ev L.V.* K voprosu analiza kalendarnykh planov [On the analysis of calendar plans], *Izvestiya TPU* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 1976, pp. 72-77.

13. *Flegontov A.V., Vilkov V.B., Chernykh A.K.* Modelirovanie zadach prinyatiya resheniy pri nechetkikh iskhodnykh dannykh [Modeling Decision-Making Tasks with Fuzzy Initial Data]. 2nd ed. Saint Petersburg: Lan', 2023, 332 p. ISBN 978-5-507-47841-5. Available at: https://e.lanbook.com/book/329102 (accessed 27 March 2025).
14. *Il'in V.V.* Po tu storonu proektov. Zapiski konsul'tanta [Beyond Projects. Consultant's Notes]. 5th ed. Moscow: Laboratoriya znaniy, 2025, 379 p. ISBN 978-5-93208-809-8. Available at: https://e.lanbook.com/book/451556 (accessed 27 March 2025).
15. *Gavrilova T.A., Kudryavtsev D.V., Muromtsev D.I.* Inzheneriya znaniy. Modeli i metody [Knowledge Engineering. Models and Methods]. 6th ed. Saint Petersburg: Lan', 2023, 324 p. ISBN 978-5-507-46580-4. Available at: https://e.lanbook.com/book/312842 (accessed 27 March 2025).
16. *Kuznetsov N.V., Sil'vestrov S.N., Pobyvaev S.A. [i dr.].* Standartizatsiya proektnogo upravleniya: monografiya [Project Management Standardization: monograph]. Moscow: Dashkov i K, 2024, 183 p. Available at: https://e.lanbook.com/book/463142 (accessed 27 March 2025).
17. *Bobryshev A.N., Agafonova N.P.* Upravlencheskiy uchet po proektam: teoriya i instrumentariy: monografiya [Managerial Accounting for Projects: Theory and Tools: monograph]. Stavropol': StGAU, 2023, 180 p. ISBN 978-5-9596-1896-4. Available at: https://e.lanbook.com/book/360182 (accessed 27 March 2025).
18. *Makovetskiy M.Yu., Shvets N.S., Barannikov A.L.* Proektnaya deyatel'nost' v kontekste obespecheniya ekonomicheskoy bezopasnosti i ustoychivogo razvitiya: monografiya [Project Activities in the Context of Ensuring Economic Security and Sustainable Development], ed. by N.V. Artem'eva, M.Yu. Makovetskogo. Moscow: MUIV, 2024, 199 p. ISBN 978-5-9580-0742-4. Available at: https://e.lanbook.com/book/443015 (accessed 27 March 2025).
19. *Alekseev G.V., Gonashvili A.S., Kirsanova N.P., Sadykova G.I., Kholyavin I.I., Usmanov I.I.* Zadachi setevogo planirovaniya v ekonomike, tekhnologii i sotsiologii: ucheb. posobie [Tasks of Network Planning in Economics, Technology, and Sociology]. Saint Petersburg, 2023, 118 p.
20. *Anichkin A.S., Semenov V.A.* Ob obobshchennoy matematicheskoy postanovke zadach proektnogo planirovaniya [On the Generalized Mathematical Formulation of Project Planning Tasks], *ITNOU: informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii* [ITNOU (Information Technologies in Science, Education, and Management)], 2017, No. 2 (2), pp. 74-86.

Богнюков Александр Алексеевич – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: bogniukovv@gmail.com; г. Волгоград, Россия; студент.

Зорькин Дмитрий Юрьевич – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: mosh285@gmail.com; г. Волгоград, Россия; преподаватель кафедры ПМ.

Тарасова Ирина Александровна – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: irina_a_tarasova@vk.com; г. Волгоград, Россия; зав. кафедрой ПМ; доцент.

Bognyukov Alexander Alekseevich – Volgograd State Technical University; e-mail: bogniukovv@gmail.com; Volgograd, Russia; student.

Zorkin Dmitry Yuryevich – Volgograd State Technical University; e-mail: mosh285@gmail.com; Volgograd, Russia; teacher of PM department.

Tarasova Irina Alexandrovna – Volgograd State Technical University; e-mail: irina_a_tarasova@vk.com; Volgograd, Russia; head of the PM department at; associate professor.

УДК 004.023+519.854.2 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-110-120

А.Б. Клименко

МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В ДИНАМИЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДАХ

Рассмотрен вопрос моделирования информационного процесса распределения вычислительных ресурсов в георасределенных гетерогенных динамичных вычислительных средах. Актуальность работы обусловлена тем, что к настоящему времени «облачные» системы обработки данных становятся недостаточными в силу необходимости обработки больших объемов данных в режиме реального времени. В связи с этим расширяется применение «туманных» и «краевых»

вычислений, что подразумевает локализацию обработки данных с целью сокращения требующегося для этого времени, с одной стороны, а с другой – ограничения на вычислительные мощности устройств приводит к необходимости распределенного решения вычислительных задач в гетерогенной, динамичной и распределенной в географическом смысле среде. Это влечет необходимость разработки новых методов и алгоритмов распределения вычислительных ресурсов, поскольку ранее разработанные методы не учитывали свойств географической распределенности и динамики вычислительных сред. Также разработанные ранее модели распределения вычислительных ресурсов не учитывают перечисленные свойства, что ставит вопрос о необходимости разработки новой модели. Предложенная в данной работе модель информационного процесса распределения вычислительных ресурсов включает параметры ресурсной стоимости передаваемых по сети данных индивидуально для узлов-участников маршрута передачи данных, а также процесса распределения вычислительных ресурсов, чем и отличается от аналогов. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают целесообразность использования предлагаемой модели при распределении вычислительных ресурсов в георапределенных гетерогенных динамичных вычислительных средах. Практическая значимость заключается в снижении ресурсоемкости процесса распределения вычислительных ресурсов и процесса решения вычислительной задачи.

Распределение вычислительных ресурсов; распределенные вычисления; георапределенная гетерогенная динамичная вычислительная среда; оптимизация; критерии оптимизации; модель процесса распределения вычислительных ресурсов.

A.B. Klimenko

A MODEL OF RESOURCES ALLOCATION INFORMATION PROCESS IN DYNAMIC DISTRIBUTED COMPUTING ENVIRONMENTS

The article considers the issue of modeling the information process of distributing computing resources in geo-distributed heterogeneous dynamic computing environments. The relevance of the work is due to the fact that by now "cloud" data processing systems are becoming insufficient due to the need to process large volumes of data in real time regime. In this regard, the "fog" and "edge" computing are in use. This implies localization of data processing in order to reduce the time required for this, on the one hand, and on the other hand, limitations on the computing power of devices leads to the need for a distributed solution of computing problems in a heterogeneous, dynamic and geographically distributed environment. This entails the need to develop new methods and algorithms for computing resources allocation, since previously developed methods did not take into account the properties of geographic distribution and dynamics of computing environments. The model of the information process of computing resources allocation proposed in this work includes the parameters of the resource cost of data transfers over the network individually for the nodes participating in the data transfer route, as well as the process of distribution of computing resources, which is what distinguishes it from analogs. The conducted experimental studies confirm the feasibility of the proposed model usage for the computing resources allocation in geo-distributed heterogeneous dynamic computing environments. The practical significance lies in reducing the resource intensity of the process of distribution of computing resources and the process of solving a computing problem.

Computing resource allocation; distributed computing; geo-distributed heterogeneous dynamic computing environment; optimization; optimization criteria; resource allocation process model.

Введение. В настоящее время одним из интенсивно развивающихся направлений в рамках применения распределенных вычислений является их организация в георапределенных гетерогенных динамичных вычислительных средах (ГГДВС), включающих группы БЛА, группы наземных и подводных роботов, FANET, MANET, VANET, сети датчиков и др. Следует отметить, что для перечисленных вычислительных сред актуальными становятся вопросы ресурсопотребления вычислений и времени решения вычислительных задач, поскольку:

- в подавляющем количестве примеров используются автономные источники питания;
- географическая распределенность порождает значительные и малопредсказуемые задержки передачи данных, что противоречит режиму функционирования в реальном времени.

Перечисленные особенности практически не отражены в известных моделях распределения вычислительных ресурсов (ВР). Например, хорошо известные модели построения расписаний [1, 2] из классической теории расписаний ориентированы на ситуацию, когда временем информационных обменов между задачами, распределенными по устройствам в распределенной системе, можно пренебречь, а возможность подсчета ресурсной стоимости транзита данных по фрагменту сети не учитывается. То же может быть сказано и о формализации и моделировании распределения ВР разнообразными задачами n-мерной упаковки [3, 4]: такой моделью может быть формализованы вычисления в системе, где маршрутом передачи данных и возникающими при этом накладными расходами можно пренебречь. Модели распределения вычислительных ресурсов, представленные в [5, 6] позволяют учесть накладные расходы на передачу данных, но при этом передача данных формализована как передача по выделенной шине/процессору, что не позволяет учитывать индивидуальные ресурсные расходы устройств по маршруту следования данных, в то время как это важно: формирование маршрутов транзита данных с включением в них вычислительных устройств без учета их состояния и текущей загруженности может приводить как к задержкам передачи данных, так и к ускоренному истощению автономных источников питания и, как следствие, к сокращению времени жизни ГГДВС.

Если вести речь о динамике ГГДВС, то здесь также следует отметить, что эта особенность никак не отражена в используемых моделях распределения ВР. Существует достаточно широкий круг работ, направленных на выявление наиболее эффективных алгоритмов (в том числе, метаэвристик) для решения той или иной задачи распределения ВР [8–10], однако, к настоящему времени не сформировано методов организации процессов распределения ВР, в которых бы также учитывалась вычислительная сложность распределения ВР, что важно в случаях, когда узел-планировщик является составляющей частью ВС и принимает участие в решении ВЗ. Здесь следует отметить, что к настоящему времени сложилось направление решения задач распределения ВР посредством использования метаэвристических алгоритмов [11–13]. Такой подход обусловлен вычислительной сложностью многокритериальных дискретных задач оптимизации, решение которых приводит к распределению ВР. Применение жадных методов не всегда позволяет получить удовлетворительные результаты, в то время как применение метаэвристик на практике позволяет получить достаточно качественную аппроксимацию оптимального решения за ограниченное время. Однако, процесс поиска решения с применением метаэвристических алгоритмов может быть ресурсоемким, и в этом случае вычислительная сложность самого процесса распределения ВР негативно влияет на значения критериев оценки ресурсопотребления решения ВЗ, в то время как в классических моделях распределения ВР это остается неучтенным. При этом открытым остается вопрос о выборе оптимальной вычислительной сложности применяемой метаэвристики, чтобы получить наилучший результат при минимально возможных ресурсных затратах.

В данной статье предложена новая математическая модель информационного процесса распределения ВР (ИПРВР), которая отличается от моделей распределения ВР на основе теории расписаний тем, что учитывает ресурсную стоимость транзита данных по ГГДВС индивидуально для каждого участника процесса передачи данных, а так же ресурсную стоимость процесса распределения ВР.

1. Постановка решаемой задачи. К настоящему времени одной из актуальных научных проблем является рациональная организация вычислительных процессов в вычислительных средах, образованных в результате участия мобильных автономных устройств. Примерами таких вычислительных сред представляются группы автономных мобильных роботов, рои дронов, географически распределенных сети датчиков, устройства «Интернета вещей». Вынужденная локализация обработки данных приводит к тому, что на краю сети надлежит решать задачи относительно высокой вычислительной сложности, но в то же время устройства, составляющие край сети, не обладают столь высокими вычислительными мощностями, как устройства, образующие «облачную» платформу. Это приводит к необходимости решения проблемы распределения вычислительных ресурсов (ВР) среди маломощных устройств, обладающих автономными источниками питания и, соответственно, к необходимости снижения ресурсных затрат для решения вычислительных задач (ВЗ).

При решении ВЗ устройствами края сети возникают обмены данными. В случае значимых объемов передаваемых данных устройства, образующие маршруты передачи данных, тратят ресурсы на передачу данных, что должно учитываться при распределении ВР. Модели ИПРВР, используемые в настоящее время, не учитывают индивидуальных ресурсных расходов узлов, составляющих маршруты передачи данных, усредняя их до канала передачи данных, вносящего временную задержку [5, 6]. Однако, для описываемых вычислительных сред важным является не только время, а ресурсная стоимость в более широком смысле для каждого узла: перегрузка вычислительного устройства приведет к ускоренному расходу электроэнергии, что потенциально приведет к сокращению длительности жизни сети.

ИПРВР реализуется устройством, на которое возложена роль планировщика. При этом ИПРВР является ВЗ, несущей дополнительную вычислительную нагрузку, и предшествующую решению ВЗ приложения. При необходимости частого перепланирования (что характерно для динамических сред), либо при необходимости частого планирования решения интенсивного потока ВЗ ресурсные накладные расходы на ИПРВР также могут быть существенными.

Целью данного исследования является разработка математической модели ИПРВР в ГГДВС с учетом ресурсных индивидуальных расходов узлов на передачу данных при решении ВЗ и ресурсной стоимости ИПРВР. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать показатели эффективности распределения ВР на основе опубликованных работ;
- сформулировать критерий эффективности ИПРВР в ГГДВС;
- разработать математическую модель ИПРВР в ГГДВС и на ее основе сформулировать задачу оптимизации;
- провести экспериментальное исследование ИПРВР в ГГДВС с использованием разработанной модели сцелью демонстрации целесообразности ее применения.

2. Методика исследования. ***2.1. Показатели эффективности распределения вычислительных ресурсов.*** Опираясь на ряд публикаций [14–20] сформируем набор показателей эффективности процесса РВР, который будет далее использован для формирования обобщенного критерия оценки эффективности ИПРВР в ГГДВС.

Для дальнейшей формализации будем использовать матрицу назначения задач на устройства $H = \|h_{ij}\|$, где

$$h_{ij} = \begin{cases} 1, \text{если задача } j \text{ назначена на устройство } i; \\ 0, \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Также введем матрицу смежности $V = |v_{jz}|$, где

$$v_{jz} = \begin{cases} v_{jz}, \text{если подзадача } j \text{ передает данные подзадаче } z, \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Сформулируем показатели эффективности распределения ВР следующим образом:

1. Стоимость привлекаемых ресурсов для одного узла:

$$Co_i^1 = \sum_{j=1}^{N} co_i w_{ij} h_{ij}, \quad (3)$$

где w_{ij} – вычислительная сложность вычислительной задачи (ВЗ) оцененная в млн. проц. инстр.

2. Стоимость привлекаемых ресурсов для фрагмента сети:

$$Co = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} co_i w_{ij} h_{ij}. \quad (4)$$

3. Энергозатраты одного узла для решения задачи:

$$E_i = E_{i_receive} + E_{i_comp} + E_{i_send} \quad (5)$$

$$E_{i_receive} = \sum_{j=1}^{N} v_j^{in} h_{ij} e_{ij}^{receive}, \quad (6)$$

где v_{in} – объем входящих данных [Мбит], e_{ij} – энергозатраты на прием 1 бита информации.

$$E_{i_comp} = \sum_{j=1}^{N} w_j h_{ij} e_{ij}^{comp}, \quad (7)$$

где w_j – вычислительная сложность задачи, в [млн. проц. инструкций], e_{ij}^{comp} – энергозатраты на выполнение одной инструкции при решении i-м узлом j-й задачи.

$$E_{i_send} = \sum_{j=1}^{N} v_j^{out} h_{ij} e_{ij}^{send}, \quad (8)$$

где v_j^{out} – объем исходящих данных [10^3 бит], e_{ij}^{send} – энергозатраты на отправку одного одного бит данных.

Полные энергозатраты фрагмента сети, участвующего в вычислительном процессе:

$$E_0 = \sum_{i=1}^{N} E_i. \quad (9)$$

4. Надежность узла:

$$P_i(\tau) = e^{-\lambda_{0i} t_i \cdot 2^{\frac{kD_i}{10}}}, \quad (10)$$

где D_i – загруженность вычислительного узла, k – коэффициент, связывающий загруженность и температуру вычислителя, t_i – время предполагаемой эксплуатации узла.

Учитывая, что подсчет ВБР сети затруднителен в смысле разделения ее на параллельные и последовательные соединения узлов, будем для совокупности узлов использовать стоимостную функцию, представляющую мультипликативную свертку значений ВБР.

Тогда показатель ВБР для фрагмента сети будет иметь вид:

$$P_0(\tau) = \prod_{i=1}^{m} e^{-\lambda_{0i} t_i \cdot 2^{\frac{kD_i}{10}}}. \quad (11)$$

5. Показатель выравнивания вычислительной нагрузки имеет вид:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(D_i - D\prime)^2}{M}}, \quad (12)$$

где D' – математическое ожидание загруженности узла.

6. Показатель нагрузки на сеть

Будем полагать показатель эффективности нагрузки на сеть суммарным количеством объемов данных, отправляемых в сетевую инфраструктуру каждым узлом, на котором размещена вычислительная задача, включая задачи транзита данных, вычислительная сложность которых включает вычислительную сложность приема и отправки некоторого объема данных. Задача транзита данных формируется как результат генерации маршрута передачи данных с последующим внесением изменений в матрицу V.

Соответственно, суммарная нагрузка на сеть в виде передаваемых в сеть данных будет иметь вид:

$$V_0 = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} h_{ij} \sum_{z=1, h_{iz}=0}^{N} v_{jz}. \quad (13)$$

2.2. Обобщенный критерий эффективности ИПРВР. Введем переменные A, U, Ro, где A – матрица назначения задач на узлы, размером NxM, N – число задач, M – число узлов, U – доля процессорного ресурса, выделяемая для решения j-й задачи на i-м узле, Ro – множество маршрутов передачи данных от j к j+1 задаче.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где

$$a_{ij} = \begin{cases} t_{ij}, \text{если задача } j \text{ назачена на узел } i, \\ 0, \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & \cdots & u_{nm} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где u_{ij} – количество процессорных ресурсов, выраженных в долях, выделяемых в рамках вычислительного устройства для задачи j. Ro – маршруты передачи данных между задачами, расположенными на различных узлах $Ro = \{Ro_j\} = \{\{i\}_{j,j+1}\}, \forall i \le m, \forall j \le n$.

Пусть S_0, P_0, s^0, p^0 множества показателей эффективности ИПРВР, зависящие от переменных A, U, Ro, где:

$S_0 = \{s_k(A,U,Ro)\}, k = 1..K$ – множество показателей эффективности, принятых для всей сети;

$P_0 = \{p_l(A,U,Ro)\}, l = 1..L$ – множество показателей эффективности, специфичные для отдельных узлов.

Множества S_0 и P_0 формируются из показателей эффективности, описанных выше, но могут быть расширены в соответствии с необходимостью.

Пусть элементы множеств нормализованы, упорядочены и сведены в следующие матрицы:

$$S'_0 = |Co_{norm}(A,U,Ro), E_0^{norm}(A,U,Ro), P_0(\tau,A,U,Ro), \Delta(A,U,Ro), V_0^{norm}(A,U,Ro)| \quad (16)$$

$$P'_0 = \left|Co_{i_{norm}}^1(A,U,Ro), E_i^{norm}(A,U,Ro), P_i(\tau,A,U,Ro), V_i^{norm}(A,U,Ro)\right|. \quad (17)$$

Также будем полагать, что имеется возможность выбора показателей эффективности РВР: для этого введем матрицы с бинарными значениями элементов s^0 и p^0:

$$s^0 = |s_z|, z = 1..|S_0|; \quad (18)$$

$$p^0 = |p_x|, x = 1..|P_0|, \quad (19)$$

где

$$s_z = \begin{cases} 1, \text{если } z-\text{й элемент выбран}, \\ 0, \text{в противном случае}. \end{cases}$$

$$p_x = \begin{cases} 1, \text{если } x-\text{й элемент выбран}, \\ 0, \quad \text{в противном случае}. \end{cases}$$

При этом необходимо также учесть накладные ресурсные расходы непосредственно процесса РВР, а также ресурсные расходы по миграции задач на целевые узлы. Обозначим их $\alpha(g_r)$ и $\beta(A)$ соответственно, где g_r – вычислительная сложность ИПРВР. Тогда обобщенный критерий эффективности ИПРВР будет иметь вид:

$$I = \min_{A,U,Ro,g_r} \prod_{z=1}^{|S_0|} \mu(s'_{0z}(A,U,Ro)s_z) \prod_{x=1}^{|P_0|} \mu(p'_{0x}(A,U,Ro)p_x) + \alpha(g_r) + \beta(A), \quad (20)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, \text{если } x = 0; \\ x, \text{в противном случае}. \end{cases}$$

2.3. Математическая модель ИПРВР в ГГДВС

1. Входные данные

♦ Множество графов задач $G_1 = \{\{G_{1s}\}_v\}$, $G_{1s} = \{g_j, R\}$, где G_{1s} – ориентированный ациклический граф, g_j – вычислительна сложность задачи j; $R=\{r_k\}$ – множество ребер взвешенных объемами передаваемых данных [Мбит].

♦ Граф сети $G_2 = \{\Upsilon, C, t\}$, $\Upsilon = \{\gamma_i\}$ – характеристики узлов, i=1..M; $C = \{c_k\}$ – скорости каналов передачи данных, k=1..Z, где M – число вершин, Z – число каналов передачи данных.

♦ Предполагаемое время эксплуатации системы t и время предполагемой эксплуатации узлов t_i.

Каждый узел сети описывается следующим кортежем:

$$\gamma_i = < p_i, c_{0i}^1, e_i^{receive}, e_i^{comp}, e_i^{send}, \lambda_0^i, t^i >,$$

где p_i – производительность узла;

c_{0i}^1 – стоимость операции вычислителя;

$e_i^{receive}$ – энергозатраты вычислителя на прием 1 бит данных;

e_i^{comp} – средние энергозатраты на одну процессорную инструкцию;
e_i^{send} – энергозатраты вычислителя на отправку 1 бит данных;
λ_0^i – интенсивность отказов i-го узла;
t^i – предполагаемое время эксплуатации i-го узла.
s_z, p_z обозначающие выбор показателей эффективности РВР.
2. Контролируемые параметры (переменные): A, U, Ro.
3. Ограничения на значения контролируемых параметров (переменных):

Задается множество ограничений constr = {constr$_k$}, которое в целом определяется особенностями узлов/ политиками владельцев узлов. Обозначенное множество ограничений включает также следующие:

♦ Время начала выполнения задачи i на узле j не меньше чем время завершения предыдущей задачи с учетом времени передачи данных по маршруту Ro_j:

$$t_{ij} + \frac{g_j}{u_{ij}p_i} + \tau(Ro_j) \le t_{lj+1}, \quad (21)$$

где $\tau(Ro_j)$ – время передачи данных по маршруту от задачи j к задаче j+1, i,l – узлы, на которых расположены задачи j, j+1 соответственно.

♦ Нагрузка каждого узла не превышает 1, с учетом нагрузки, возникающей при транзите данных задач, не расположенных на узле.

$$\forall i: \frac{\sum_{j=1}^{n}\frac{g_j}{u_{ij}p_i}+\sum_{k=1,k\neq j}^{n}\frac{\xi r_k}{u_{ij}p_i}}{T} \le 1. \quad (22)$$

где $i \in Ro_k, Ro_k \in \{Ro\}, \xi$ – коэффициент, определяющий вычислительную сложность приема/передачи 1 бит данных в процессорных операциях.

♦ Ограничение на время выполнения задачи: $T<T_0$, где T – фактическое время завершения решения задачи, T_0 – заданное время.

ИПРВР реализует принятие решения по распределению ВР, то есть, реализуется решением следующей задачи оптимизации: имея заданные s^0, p^0,G_1, G_2, *constr*, найти значения A, U, Ro чтобы обеспечить

$$\prod_{z=1}^{|S_0|}\mu(s'_{0z}(A,U,Ro)s_z)\prod_{x=1}^{|P_0|}\mu(p'_{0x}(A,U,Ro)p_x)+\alpha(g_r)+\beta(A)\to min.$$

3. Экспериментальное исследование целесообразности применения модели. Проведенный эксперимент направлен на:

♦ выяснение целесообразности применения в модели учета транзитной нагрузки для распределения задач;
♦ выяснение целесообразности введения штрафной функции $\alpha(g_r)$.

На рис. 2 приведены, соответственно, граф фрагмента сети и граф вычислительной задачи для решения. Вершины графа сети взвешены производительностями, вершины графа вычислительной задачи – вычислительными сложностями.

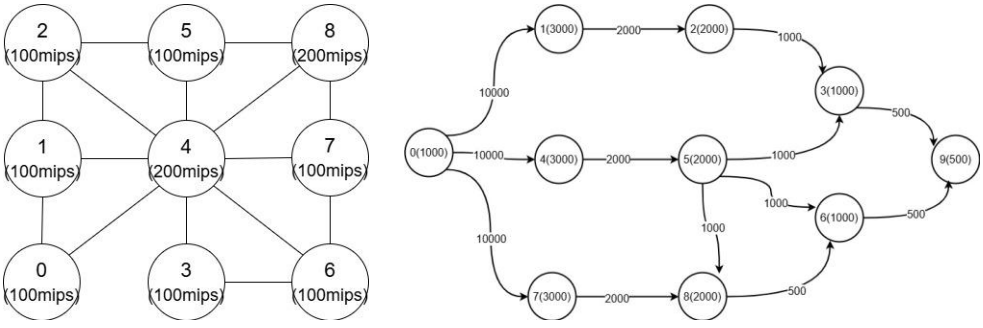


Рис. 2. Фрагмент вычислительной сети и вычислительная задача

При использовании классической модели составления расписания для параллельных независимых машин и задач с ограничением на следование, было получено распределение, представленное на рис. 3.

На рис. 3 видно, что при этом в наличии многочисленные обмены данными через сеть между задачами, размещенными на различных узлах. Также перегружен узел 4 по причине транзита значительного объема данных.

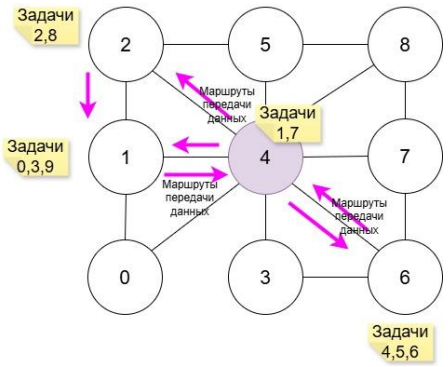


Рис. 3. Распределение задач без учета транзита данных

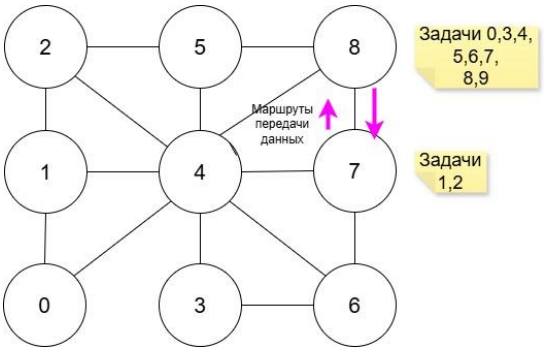


Рис. 4. Распределение задач с учетом транзита данных

На рис. 4 решение задачи оптимизации, сформулированной на основе математической модели ИПРВР в ГГДВС, значительно отличается от решения на рис. 3: существенно сокращены межузловые обмены данными, равно как отсутствуют маршруты, где имеет место передача данных по транзитным узлам.

Индвидуальные энергозатраты каждого узла показаны на диаграмме рис. 5.

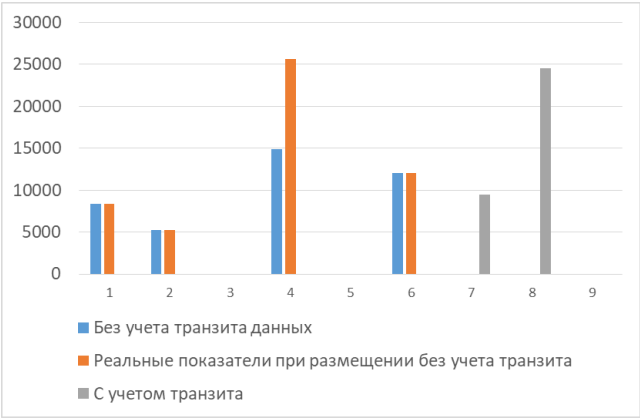


Рис. 5. Энергозатраты узлов сети на решения задачи

На рис. 5 показаны энергозатраты узлов, рассчитанные при помощи модели без учета транзита данных, при этом показана также реальная ситуация – более 30% неучтенных энергозатрат, которые приходятся на транзит данных.

При этом общее энергопотребление системы (рис. 6) снижено на 34% при использовании модели с учетом транзита данных.

Таким образом, вполне очевидной является целесообразность использования модели ИПРВР в ГГДВС при распределении вычислительных задач.

Далее, рассмотрим пример влияния ресурсоемкости ИПРВР на общее энергопотребление системы. Для этого будем считать ИПРВР отдельной задачей, которую также можно распределить на один из узлов сети. При распределении с учетом транзита дан-

ных с использованием алгоритма роя частиц был получен ряд размещений (табл. 1). При этом в среднем при возрастании ресурсоемкости ИПРВР энергозатраты также возросли на 12,2%.

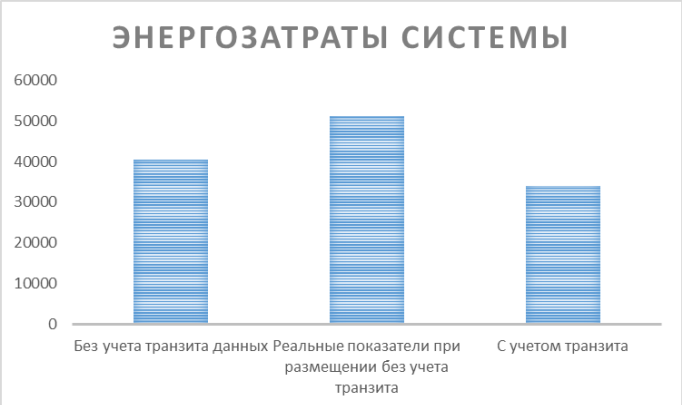


Рис. 6. Общие энергозатраты системы

Таблица 1

Энергозатраты на решение ВЗ и ИПРВР

	Вычислительная сложность ИПРВР = $500*10^9$ проц. оп.	Вычислительная сложность ИПРВР = $1000*10^9$ проц. оп.
Размещение 1	$16641*10^9$ [пДж]	$18605*10^9$[пДж]
Размещение 2	$18260*10^9$[пДж]	$20949*10^9$[пДж]
Размещение 3	$18819*10^9$[пДж]	$22142*10^9$[пДж]
Размещение 4	$17916*10^9$[пДж]	$18234*10^9$[пДж]
Размещение 5	$16033*10^9$[пДж]	$18570*10^9$[пДж]
Повышение энергозатрат на 12,2%		

Таким образом, процесс РВР в рамках заданных значений оказывает влияние на ресурсоемкость ИПРВР, и его учет также целесообразен.

Заключение. В данной статье представлена математическая модель ИПРВР в ГГДВС, учитывающая такие особенности ГГДВС как георазпределенность, гетерогенность и динамика. В отличие от ранее разработанных моделей, предлагаемая модель ИПРВР в ГГДВС имеет параметры, позволяющие учесть ресурсную стоимость передачи данных для всех узлов, участвующих при формировании маршрута, а также параметр, определяющий ресурсную стоимость самого ИПРВР, что и составляет новизну модели. Ряд проведенных экспериментов продемонстрировал целесообразность использования такой модели как с точки зрения снижения ресурсоемкости выполнения ВЗ (до 34%), так и с точки зрения ресурсоемкости ИПРВР в ГГДВС (до 12,2% повышение ресурсных затрат при удвоении ресурсоемкости ИПРВР). Практическую значимость результатов исследования составляет снижение ресурсной стоимости ИПРВР и реализации ВЗ в ГГДВС. На основе предложенной модели ИПРВР целесообразна разработка алгоритмов планирования вычислений при локальной обработке данных группами устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В.* Теория расписаний: пер. с англ. В.А. Кокотушкина, Д.Г. Михалева / под ред. Г.П. Башарина. – М.: Наука, 1975. – 359 с.
2. *Танаев В.С., Гордон В.С., Шафранский Я.М.* Теория расписаний. Одностадийные системы. – М.: Наука, 1984.
3. *Lastra-Díaz, Juan & Ortuño, M. Teresa*. Mixed-integer programming models for irregular strip packing based on vertical slices and feasibility cuts // European Journal of Operational Research. – 2023. – 313. 10.1016/j.ejor.2023.08.009.

4. *Coffman Jr., Edward G., Garey M.R.; Johnson David S., Tarjan Robert Endre.* Performance Bounds for Level-Oriented Two-Dimensional Packing Algorithms // SIAM J. Comput. – 1980. – 9 (4). – P. 808-826. – DOI: 10.1137/0209062.
5. *Барский А.Б.* Параллельные процессы в вычислительных системах. Планирование и организация. – М.: Радио и связь, 1990.
6. *Топорков В.В.* Модели распределенных вычислений. – М.: Физматлит, 2004. – 315 p. – ISBN 5-9221-0495-0.
7. *Yang H. et al.* An improved spherical evolution with enhanced exploration capabilities to address wind farm layout optimization problem // Eng. Appl. Artif. Intell. – 2023. 123, 106198, 106198. – https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106198.
8. *Aksoy İ.C., & Mutlu M.M.* Comparing the performance of metaheuristics on the Transit Network Frequency Setting Problem // Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2024. – P. 1-20. – https://doi.org/10.1080/15472450.2024.2392722.
9. *Naka E., Zeqo E., & Kaziu A.* Performance Analysis of Metaheuristic Algorithms on Benchmark Functions // Interdisciplinary Journal of Research and Development. – 2024. – 11 (2), 10. – https://doi.org/10.56345/ijrdv11n202.
10. *Tshewang Phuntsho, Tad Gonsalves*. Metaheuristics Portfolio Optimization for Resource-Constrained Project Scheduling Problems with Milestones Payments, 14 July 2024, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. – https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4725224/v1.
11. *Cuevas E., Rosas Caro J.C., Alejo Reyes A., González Ayala P., Rodriguez A*. The Simulated Annealing Method // In: Optimization in Industrial Engineering. Synthesis Lectures on Engineering, Science, and Technology. – Springer, Cham, 2025. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-74027-5_8.
12. *Di Chen.* Application of Improved Genetic Algorithms in Path Planning // Journal of Internet Technology. – Dec. 2024. – Vol. 25, No. 7. – P. 1091-1099.
13. *Kaid H., Al-Ahmari A., Al-Shayea A., Abouel Nasr E., Kamrani A.K., Mahmoud H.A.* Metaheuristics for optimizing unrelated parallel machines scheduling with unreliable resources to minimize makespan // Advances in Mechanical Engineering. – 2022. – 14 (5). – DOI: 10.1177/16878132221097023.
14. *Wang Q., Chen S.* Latency-minimum offloading decision and resource allocation for fog-enabled Internet of Things networks // Trans. Emerg. Telecommun. Technol. – 2020, 31, e3880.
15. *Kopras B., Idzikowski F., Chen W.C., Wang T.J., Chou C.T., Bogucka H.* Latency-Aware Virtual Network Embedding using Clusters for Green Fog Computing // In Proceedings of the 2020 IEEE Globecom Workshops, Taipei, Taiwan, 7–11 December 2020.
16. *Khumalo N., Oyerinde O., Mfupe L.* Reinforcement Learning-based Computation Resource Allocation Scheme for 5G Fog-Radio Access Network // In Proceedings of the 2020 Fifth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC), Paris, France, 20–23 April 2020. – P. 353-355.
17. *Salehnia T. et al.* SDN-based optimal task scheduling method in Fog-IoT network using combination of AO and WOA // Handbook of Whale Optimization Algorithm. – Elsevier, 2024. – P. 109-128.
18. *Salimi R., Azizi S., Abawajy J.* A greedy randomized adaptive search procedure for scheduling IoT tasks in virtualized fog–cloud computing // Trans. Emerg. Telecommun. Technol. – 2024. – Vol. 35, No. 5.
19. *Vakilian S., Fanian A.* Enhancing Users' Quality of Experienced with Minimum Energy Consumption by Fog Nodes Cooperation in Internet of Things // In Proceedings of the 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tabriz, Iran, 4–6 August 2020.
20. *Vakilian S., Moravvej S.V., Fanian A.* Using the Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm in Collaboration with the Fog Nodes in the Internet of Things Three-layer Architecture // In Proceedings of the 2021 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, 18–20 May 2021. – P. 509-513.

REFERENCES

1. *Konvey R.V., Maksvell V.L., Miller L.V.* Teoriya raspisaniy [Theory of scheduling]: transl. from engl. byV.A. Kokotushkina, D.G. Mikhaleva, ed. by G.P. Basharina. Moscow: Nauka, 1975. 359 p.
2. *Tanaev V.S., Gordon V.S., SHafranskiy Ya.M.* Teoriya raspisaniy. Odnostadiynye sistemy [Scheduling theory. Single stage systems]. Moscow: Nauka, 1984.
3. *Lastra-Díaz, Juan & Ortuño, M. Teresa*. Mixed-integer programming models for irregular strip packing based on vertical slices and feasibility cuts, *European Journal of Operational Research,* 2023. 313. 10.1016/j.ejor.2023.08.009.
4. *Coffman Jr., Edward G., Garey M.R.; Johnson David S., Tarjan Robert Endre.* Performance Bounds for Level-Oriented Two-Dimensional Packing Algorithms, *SIAM J. Comput,* 1980, 9 (4), pp. 808-826. DOI: 10.1137/0209062.
5. *Barskiy A.B.* Parallel'nye protsessy v vychislitel'nykh sistemakh. Planirovanie i organizatsiya [Parallel processes in computing systems. Planning and organization]. Moscow: Radio i svyaz', 1990.
6. *Toporkov V.V.* Modeli raspredelennykh vychisleniy [Distributed computing models]. Moscow: Fizmatlit, 2004, 315 p. ISBN 5-9221-0495-0.

7. *Yang H. et al.* An improved spherical evolution with enhanced exploration capabilities to address wind farm layout optimization problem, *Eng. Appl. Artif. Intell*., 2023. 123, 106198, 106198. Available at: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106198.
8. *Aksoy İ.C., & Mutlu M.M.* Comparing the performance of metaheuristics on the Transit Network Frequency Setting Problem, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2024, pp. 1-20. Available at: https://doi.org/10.1080/15472450.2024.2392722.
9. *Naka E., Zeqo E., & Kaziu A.* Performance Analysis of Metaheuristic Algorithms on Benchmark Functions, *Interdisciplinary Journal of Research and Development,* 2024, 11 (2), 10. Available at: https://doi.org/10.56345/ijrdv11n202.
10. *Tshewang Phuntsho, Tad Gonsalves*. Metaheuristics Portfolio Optimization for Resource-Constrained Project Scheduling Problems with Milestones Payments, 14 July 2024, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. Available at: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4725224/v1.
11. *Cuevas E., Rosas Caro J.C., Alejo Reyes A., González Ayala P., Rodriguez A*. The Simulated Annealing Method, *In: Optimization in Industrial Engineering. Synthesis Lectures on Engineering, Science, and Technology*. Springer, Cham, 2025. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-74027-5_8.
12. *Di Chen.* Application of Improved Genetic Algorithms in Path Planning, *Journal of Internet Technology*. Dec. 2024, Vol. 25, No. 7, pp. 1091-1099.
13. *Kaid H., Al-Ahmari A., Al-Shayea A., Abouel Nasr E., Kamrani A.K., Mahmoud H.A.* Metaheuristics for optimizing unrelated parallel machines scheduling with unreliable resources to minimize makespan, *Advances in Mechanical Engineering,* 2022, 14 (5). DOI: 10.1177/16878132221097023.
14. *Wang Q., Chen S.* Latency-minimum offloading decision and resource allocation for fog-enabled Internet of Things networks, *Trans. Emerg. Telecommun. Technol,* 2020, 31, e3880.
15. *Kopras B., Idzikowski F., Chen W.C., Wang T.J., Chou C.T., Bogucka H.* Latency-Aware Virtual Network Embedding using Clusters for Green Fog Computing, *In Proceedings of the 2020 IEEE Globecom Workshops, Taipei, Taiwan, 7–11 December 2020*.
16. *Khumalo N., Oyerinde O., Mfupe L.* Reinforcement Learning-based Computation Resource Allocation Scheme for 5G Fog-Radio Access Network, *In Proceedings of the 2020 Fifth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC), Paris, France, 20–23 April 2020,* pp. 353-355.
17. *Salehnia T. et al.* SDN-based optimal task scheduling method in Fog-IoT network using combination of AO and WOA, *Handbook of Whale Optimization Algorithm*. Elsevier, 2024, pp. 109-128.
18. *Salimi R., Azizi S., Abawajy J.* A greedy randomized adaptive search procedure for scheduling IoT tasks in virtualized fog–cloud computing, *Trans. Emerg. Telecommun. Technol*., 2024, Vol. 35, No. 5.
19. *Vakilian S., Fanian A.* Enhancing Users' Quality of Experienced with Minimum Energy Consumption by Fog Nodes Cooperation in Internet of Things, *In Proceedings of the 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tabriz, Iran, 4–6 August 2020*.
20. *Vakilian S., Moravvej S.V., Fanian A.* Using the Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm in Collaboration with the Fog Nodes in the Internet of Things Three-layer Architecture, *In Proceedings of the 2021 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, 18–20 May 2021,* pp. 509-513.

Клименко Анна Борисовна – Российский государственный гуманитарный университет; e-mail: anna_klimenko@mail.ru; г. Москва, Россия; к.т.н.; доцент кафедры фундаментальной и прикладной математики.

Klimenko Anna Borisovna – Russian State University for Humanities; e-mail: anna_klimenko@mail.ru; cand. in eng. sc.; associate professor of Fundamental and Applied Mathematics Department.

УДК 330.4 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-120-127

С.И. Носков, С.В. Беляев

ГРУППИРОВКА ПРЕДИКТОРОВ В КОМБИНИРОВАННОЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Дан краткий обзор публикаций по применению при математическом моделировании сложных систем комбинированных конструкций, содержащих в качестве составных элементов известные модельные формы. В частности, рассмотрены: алгоритм оценки параметров для создания математических моделей динамических систем; структурированные математические модели кислородного электрода и биологической очистки сточных вод; комбинированная модель, вклю-

чающая ионный обмен между кальцием и медью; объединение нестандартных конечно-разностных схем и метода экстраполяции Ричардсона для получения численных решений двух моделей биологических систем; математическая формулировка задачи и эвристический подход к оптимальному планирования маршрутов доставки в мультимодальной системе; математическая модель оптимизации стратегических и тактических решений во всех видах цепочек поставок на основе биомассы; метод разработки моделей различных типов для элементов химико-технологических систем с учетом различных видов имеющейся информации и объединении этих моделей в единый комплекс. Сформулированы два варианта постановки задачи вычисления оценок параметров комбинированной кусочно-линейной регрессии – при непустом и пустом пересечении индексных множеств, задающих состав независимых переменных в линейной и кусочно-линейной компонентах модели. Показано, что в обоих случаях при выборе в качестве функции потерь суммы абсолютных отклонений ошибок аппроксимации эти варианты сводятся к задачам линейно-булева программирования. Построены две версии комбинированной кусочно-линейной регрессионной модели выручки горно-металлургической компании «Северсталь». В качестве независимых переменных модели использованы объемы производства: горячекатанного, холоднокатанного и оцинкованого листа, листа с другим металлическим покрытием, листа с полимерным покрытием, сортового проката, метизной продукции.

Комбинированная кусочно-линейная регрессионная модель; группировка предикторов; задача линейно-булева программирования; индексное множество; мощность множества; горно-металлургическая компания.

S.I. Noskov, S.V. Belyaev

GROUPING PREDICTORS IN COMBINED PIECEWISE LINEAR REGRESSION

The article provides a brief overview of publications on the application of combined structures containing known model forms as constituent elements in mathematical modeling of complex systems. In particular, the following are considered: an algorithm for estimating parameters for creating mathematical models of dynamic systems; structured mathematical models of an oxygen electrode and biological wastewater treatment; a combined model including ion exchange between calcium and copper; a combination of non-standard finite-difference schemes and the Richardson extrapolation method to obtain numerical solutions of two models of biological systems; a mathematical formulation of the problem and a heuristic approach to optimal planning of delivery routes in a multimodal system; a mathematical model for optimizing strategic and tactical decisions in all types of biomass-based supply chains; a method for developing models of various types for elements of chemical-engineering systems taking into account various types of available information and combining these models into a single complex. Two variants of the problem statement for calculating the estimates of the parameters of a combined piecewise linear regression are formulated: with a non-empty and empty intersection of the index sets that define the composition of the independent variables in the linear and piecewise linear components of the model. It is shown that in both cases, when the sum of absolute deviations of approximation errors is selected as the loss function, both variants are reduced to linear-Boolean programming problems. Two versions of a combined piecewise linear regression model of revenue of the mining and metallurgical company Severstal are constructed. The following production volumes are used as independent variables of the model: hot-rolled, cold-rolled and galvanized sheet, sheet with another metal coating, sheet with a polymer coating, rolled products, hardware products.

Combined piecewise linear regression model; predictor grouping; linear-Boolean programming problem; index set; set power; mining and metallurgical company.

Введение. Исследование сложных объектов различного характера с помощью методов математического моделирования часто требует применения комбинированных формальных конструкций, содержащих в качестве составных элементов известные модельные формы. Так, в работе [1] обсуждается алгоритм оценки параметров для создания математических моделей динамических систем и представлен алгоритм рекурсивных наименьших квадратов на основе оценочных состояний, вычисляемых с помощью фильтра Калмана. В [2] структурированные математические модели кислородного электрода и биологической очистки сточных вод объединены для оптимизации положения электрода в биореакторе. Выявлены параметры, к изменению которых, как показало тестирование модели, она наиболее чувствительна. В исследовании [3] изучается адсорбция меди на инкапсулированном альгинатом кальция магнитном сорбенте. Разработана комбиниро-

ванная модель, которая включает ионный обмен между кальцием и медью, координационную реакцию между функциональной группой и медью, а также образование поверхностного комплекса между оксидом железа и медью. Статья [4] посвящена объединению нестандартных конечно-разностных схем и метода экстраполяции Ричардсона для получения численных решений двух моделей биологических систем. В некоторых случаях необходимо, чтобы численные решения правильно воспроизводили динамическое поведение систем, а в других – просто найти стационарное состояние. В [5] предложен комплексный подход к разработке моделей упругости, пластичности и разрушения неоднородных материалов в рамках метода дискретных элементов.

В работе [6] представлена математическая формулировка задачи и эвристический подход к оптимальному планирования маршрутов доставки в мультимодальной системе, объединяющей грузовики и беспилотные летательные аппараты. Модель имеет форму задачи смешанно-целочисленного линейного программирования. В исследовании [7] представлена математическая модель OPTIMASS для оптимизации стратегических (например, местоположение и тип объекта) и тактических (например, распределение) решений во всех видах цепочек поставок на основе биомассы. В [8] представлена комбинированная модель прогнозирования смещения бетонной плотины с помощью линейной модели авторегрессионного интегрированного скользящего среднего, в которой регрессионная модель опорных векторов строится для оптимизации и обработки нелинейного высокочастотного сигнала. В статье [9] предложен метод, заключающийся в разработке моделей различных типов (детерминированных, статистических, нечетких, гибридных) для элементов химико-технологических систем с учетом различных типов имеющейся информации (теоретической, статистической, нечеткой) и объединении этих моделей в единый комплекс. В [10] разработан комбинированный алгоритм идентификации математических моделей маневрирования судна, основанный на классическом генетическом алгоритме.

Следует также отметить посвященные разработке и анализу комбинированных моделей работы: [11] (применение комбинированной искусственной нейронной сети при моделировании компьютерных инцидентов), [12] (прогнозирование концентраций загрязняющих выбросов на основе вейвлет-преобразований и искусственных нейронных сетей), [13] (математическая модель процессов циклического вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах), [14] (комбинированный метод верификации объектно-ориентированных моделей данных), [15] (комбинированная модель процесса оценивания достоверности контроля технического состояния космических аппаратов в условиях неопределенности), [16] (математические модели структурного анализа элементов мультисервисных сетей связи).

Оценивание параметров и формирование групп переменных в комбинированной кусочно-линейной регрессии. В работе [17] предложен алгоритмический способ идентификации параметров комбинированной кусочно-линейной регрессионной модели

$$y_k = \alpha_0 + \sum_{i\in I_1} \alpha_i x_{ki} + \min_{j\in I_2}\{\beta_j x_{kj}\} + \varepsilon_k,\ k = \overline{1,n}. \quad (1)$$

Здесь y – зависимая переменная, x_i, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ – независимые переменные, α_0, α_i, $i \in I_1$, β_j, $j \in I_2$ - подлежащие вычислению параметры, k – номер наблюдения выборки данных, n – ее длина, ε_k – ошибки аппроксимации, I_1 и I_2 – наперед заданные индексные множества номеров предикторов. При этом

$$I_1 \cup I_2 = \{1,2,\dots,m\}$$

и, в общем случае,

$$I_1 \cap I_2 \neq \emptyset.$$

Все переменные в модели (1) детерминированы.

Заметим, что, если модель (1) построена для экономического объекта, ее кусочно-линейная составляющая $\min_{j\in I_2}\{\beta_j x_{kj}\}$ представляет собой правую часть производственной функции с постоянными пропорциями, называемой также функцией Леонтьева (см., например [18–20]).

В [17] при условии, что в качестве функции потерь выбрана сумма модулей ошибок аппроксимации

$$L(\alpha,\beta)=\sum_{k=1}^{n}|\varepsilon_k|, \quad (2)$$

задача оценивания параметров модели (1) сведена к задаче линейно-булева программирования (ЛБП).

Представим эту задачу в более общем виде, а именно, пусть требуется не только рассчитать значения векторов параметров модели (1), но и сформировать индексные множества I_1 и I_2, допуская при этом их непустое пересечение. Будем только считать наперед заданным количество элементов в каждом из этих множествах, их мощность:

$$|I_1| = p_1, |I_2| = p_2.$$

В этом случае функция потерь (2) должна быть преобразована к виду

$$L_1(\alpha,\beta,I_1,I_2) = \sum_{k=1}^{n}|\varepsilon_k|.$$

Для сведения задачи минимизации функции $L_1(\alpha,\beta,I_1,I_2)$ к задаче ЛБП воспользуемся вычислительными приемами из [17, 21]. Введем следующие булевы переменные:

$$\delta_i = \begin{cases} 1, & i \in I_1 \\ 0, & i \notin I_1 \end{cases},$$

$$\gamma_j = \begin{cases} 1, & j \in I_2 \\ 0, & j \notin I_2 \end{cases}.$$

Тогда последняя примет вид:

$$\alpha_0 + \sum_{i=1}^{m}\alpha_i x_{ki} + z_k + u_k - v_k = y_k, \quad k = \overline{1,n}, \quad (3)$$

$$-\delta_i B_i \le \alpha_i \le \delta_i B_i, i = \overline{1,m}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{m}\delta_i = p_1, \quad (5)$$

$$z_k \le \beta_j x_{kj}, \ k = \overline{1,n}, j = \overline{1,m}, \quad (6)$$

$$\beta_j x_{kj} - z_k \le (1-\sigma_{kj})M_j, k = \overline{1,n}, j = \overline{1,m}, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{m}\sigma_{kj}=1, k = \overline{1,n}, \quad (8)$$

$$\beta_j \ge (1-\gamma_j)N_j, j = \overline{1,m}, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{m}\gamma_j = p_2, \quad (10)$$

$$\sigma_{ki} \in \{0,1\}, \ k = \overline{1,n}, \ i = \overline{1,m}, \quad (11)$$

$$\delta_i \in \{0,1\}, \quad i = \overline{1,m}, \quad (12)$$

$$\gamma_j \in \{0,1\}, \quad j = \overline{1,m}, \quad (13)$$

$$u_k \ge 0, v_k \ge 0, z_k \ge 0, \ k = \overline{1,n}, \quad (14)$$

$$L_1(\alpha,\beta,I_1,I_2) = \sum_{k=1}^{n}(u_k + v_k) + \mu\sum_{j=1}^{m}\beta_j \to min. \quad (15)$$

Здесь μ и $M_i, B_i, i = \overline{1,m}$ – наперед заданные соответственно малое и большие положительные числа, N_j=$10\max\limits_{k=\overline{1,n}}\frac{y_k}{x_{kj}}$, $j = \overline{1,m}$. При этом должно соблюдаться условие N_j<<$M_j, j = \overline{1,m}$.

Таким образом, при δ_i=0 i-ая независимая переменная войдет в линейную часть модели (1) с нулевым коэффициентом (т.е. не войдет вовсе). Если же γ_j=0, то j-ый предиктор войдет в кусочно-линейную ее часть с коэффициентом, не меньшим чем M_j, следовательно, минимум в модели не сработает на переменной x_j ни на одном наблюдении выборки данных (т.е. x_j не попадет в эту часть).

Для того, чтобы обеспечить иногда требуемое в соответствии с целью моделирования выполнение условия $I_1 \cap I_2 = \emptyset$, необходимо включить в состав ограничений задачи ЛБП следующие равенства:

$$\delta_i + \gamma_j = 1, i = \overline{1,m}. \quad (16)$$

Комбинированная кусочно-линейная регрессионная модель горно-металлургической компании «Северсталь». Применим предложенный выше подход для построения модели выручки горно-металлургической компании «Северсталь». Воспользуемся при этом статистической информацией за 2009 – 2021 гг. (табл. 1) [22]. Введем следующие обозначения: y – выручка, млн. долл.; x_1 – горячекатаный лист, тыс. т.; x_2 – холоднокатаный лист, тыс. т.; x_3 – оцинкованный лист и лист с другим металлическим покрытием, тыс. т.; x_4 – лист с полимерным покрытием, тыс. т.; x_5 – сортовый прокат, тыс. т.; x_6 – метизная продукция, тыс. т.

Таблица 1

Статистическая информация

Год	y	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
2009	13050	5977	2599	2228	294	759	806
2010	13573	6403	2252	1733	244	762	784
2011	15812	6053	1916	1991	241	805	764
2012	14104	6439	1835	2071	368	819	827
2013	9434	4206	1419	615	450	889	662
2014	8296	3662	1443	592	434	1168	636
2015	6396	3988	1336	624	418	1269	610
2016	5916	4080	964	560	386	1401	639
2017	7848	3949	1324	654	403	1406	615
2018	8580	3895	1286	835	391	1460	560
2019	8157	4382	977	934	448	1234	563
2020	6870	4442	918	939	471	668	587
2021	11638	4815	1092	1015	401	651	603

Зададим мощность индексных множеств I_1 и I_2: $p_1 = p_2$=3. Вначале путем решения задачи ЛБП (3)–(15) построим модель (1) с возможностью непустого пересечения этих множеств. При этом, учитывая положительный характер влияния всех шести предикторов на зависимую переменную, скорректируем ограничения (4) следующим образом:

$$0 \le \alpha_i \le \delta_i M_i, i = \overline{1,6}. \quad (17)$$

В результате получим модель:

$$y_k = -8384 + 1.95x_{k1} + 0.69x_{k3} + min\{2.5x_{k1}, 6.5x_{k2}, 10.9x_{k5}\} + \varepsilon_k, k = \overline{1,13}, \text{E=7.6}, \quad (18)$$

где E – средняя процентная ошибка. При этом, хоть значение δ_2 и оказалось равно единице, но в линейную часть модели (18) переменная x_2 не вошла вследствие равенства нулю параметра α_2, вызванного ограничениями (17). А вот переменная x_1 вошла и в линейную, и в кусочно-линейную части модели.

Теперь построим модель (1), потребовав пустоты пересечения множеств I_1 и I_2, включив в состав ограничений задачи ЛБП ограничения (16):

$$y_k = -8320 + 1.99x_{k1} + 0.72x_{k3} + min\{6.2x_{k2}, 10.3x_{k5}, 14.1x_{k6}\} + \varepsilon_k, k = \overline{1,13}, \text{E=7.64}. \quad (19)$$

Как легко убедиться, множество I_1 для моделей (18) и (19) одно и то же, а вот составы множества I_2 существенно различаются. Обращает также на себя внимание тот факт, что переменная x_4 не вошла ни в один из построенных вариантов модели, что указывает на ее статистическую незначимость. Отметим также, что, судя по значению критерия адекватности E, оба они обладают хорошим аппроксимационным качеством.

Заключение. В работе представлены две версии постановки задачи идентификации параметров комбинированной кусочно-линейной регрессии – с возможностью непустоты пересечения индексных множеств, определяющих состав линейной и кусочно-линейной составляющих модели, и без такой возможности. Показано, что в обоих случаях при выборе в качестве функции потерь суммы модулей ошибок аппроксимации обе задачи сводятся к задачам линейно-булева программирования. Построены два варианта комбинированной кусочно-линейной регрессионной модели горно-металлургической компании «Северсталь».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Feng Ding.* Combined state and least squares parameter estimation algorithms for dynamic systems // Applied Mathematical Modelling. - 2014. – Vol. 38, No. 1. – P. 403-412. – DOI: 10.1016/j.apm.2013.06.007.
2. *Mario Novak, Predrag Horvat.* Mathematical modelling and optimisation of a waste water treatment plant by combined oxygen electrode and biological waste water treatment model // Applied Mathematical Modelling. – 2012. - Vol. 36, No. 8. – P. 3813-3825. – DOI: 10.1016/j.apm.2011.11.028.
3. *Soh-Fong Lim, Yu-Ming Zheng, Shuai-Wen Zou, J. Paul Chen.* Characterization of Copper Adsorption onto an Alginate Encapsulated Magnetic Sorbent by a Combined FT-IR, XPS, and Mathematical Modeling Study // Environmental Science & Technology. – 2008. – Vol. 42, No. 7. – P. 2551-2556. – DOI: 10.1021/es7021889.
4. *Gilberto González-Parra, Abraham J. Arenas, Benito M. Chen-Charpentier.* Combination of nonstandard schemes and Richardson's extrapolation to improve the numerical solution of population models // Mathematical and Computer Modelling. – 2010. – Vol. 52, No. 7–8. – P. 1030-1036. - DOI: 10.1016/j.mcm.2010.03.015.
5. *S.G. Psakhie, E.V. Shilko, A.S. Grigoriev, S.V. Astafurov, A.V. Dimaki, A.Yu. Smolin.* A mathematical model of particle–particle interaction for discrete element based modeling of deformation and fracture of heterogeneous elastic–plastic materials // Engineering Fracture Mechanics. – 2014. – Vol. 130. – P. 96-115. - DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.04.034.
6. *Mohammad Moshref-Javadi, Ahmad Hemmati, Matthias Winkenbach.* A truck and drones model for last-mile delivery: A mathematical model and heuristic approach // Applied Mathematical Modelling. – 2020. – Vol. 80. – P. 290-318. – DOI: 10.1016/j.apm.2019.11.020.
7. *Annelies De Meyer, Dirk Cattrysse, Jos Van Orshoven.* A generic mathematical model to optimise strategic and tactical decisions in biomass-based supply chains (OPTIMASS) // European Journal of Operational Research. – 2015. – Vol. 245, No. 1. – P. 247-264. – DOI: 10.1016/j.apm.2019.11.020.
8. *Bowen Wei, Liangjie Chen, Huokun Li, Dongyang Yuan, Gang Wang.* Optimized prediction model for concrete dam displacement based on signal residual amendment // Applied Mathematical Modelling. – 2020. – Vol. 78. – P. 20-36. – DOI: 10.1016/j.apm.2019.09.046.
9. *Orazbayev B.B., Orazbayeva K.N., Utenova B.E.* Development of mathematical models and modeling of chemical engineering systems under uncertainty // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2014. - Vol. 48. – P. 138-147. – DOI: 10.1134/S0040579514020092.
10. *Serge Sutulo, C. Guedes Soares.* An algorithm for offline identification of ship manoeuvring mathematical models from free-running tests // Ocean Engineering. – 2014. – Vol. 79. – P. 10-25. – DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.01.007.
11. *Саенко И.Б., Маликов А.В., Авраменко В.С., Ясинский С.А.* Нейросетевая модель диагностирования компьютерных инцидентов на объектах критической информационной инфраструктуры // Информация и космос. – 2019. – № 3. – С. 77-84.
12. *Кропотов Ю.А., Проскуряков А.Ю., Белов А.А., Колпаков А.А.* Модели, алгоритмы системы автоматизированного мониторинга и управления экологической безопасности промышленных производств // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 2. – С. 184-197.
13. *Волков И.А., Игумнов Л.А., Волков А.И., Юдинцева А.И.* Расчет ресурсных характеристик конструкционных сплавов при взаимном влиянии усталости и длительной прочности материала // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2023. – № 4. – С. 64-82.
14. *Семенов В.А., Морозов С.В., Ильин Д.В.* Комбинированный метод верификации масштабных моделей данных // Труды Института системного программирования РАН. – 2014. – Т. 26, № 2. – С. 197-230.
15. *Барановский А.М., Белозеров В.А., Опрышко Д.И.* Комбинированная модель процесса оценивания достоверности контроля технического состояния космических аппаратов в условиях неопределенности // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2009. – Т. 52, № 4. – С. 56-61.
16. *Михалевич И.Ф.* Структурный анализ элементов мультисервисных сетей связи // Телекоммуникации. – 2007. – № 2. – С. 2-9.

17. *Носков С.И.* Идентификация параметров комбинированной кусочно-линейной регрессионной модели // Вестник Югорского государственного университета. – 2022. – № 4 (67). – С. 115-119.
18. *Носков С.И., Лоншаков Р.В.* Идентификация параметров кусочно-линейной регрессии // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – 2008. – № 6. – С. 63-64.
19. *Носков С.И., Хоняков А.А.* Кусочно-линейные регрессионные модели объемов перевозки пассажиров железнодорожным транспортом // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2021. – № 4 (40). – С. 80-89.
20. *Носков С.И.* Кусочно-линейная производственная функция погрузки на железнодорожном транспорте // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2022. – № 4. – С. 72-79.
21. *Носков С.И., Жукова М.С., Кириллова Т.К., Купитман Ю.О., Хоняков А.А.* Уточнение способов идентификации параметров некоторых кусочно-линейных регрессий // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2023. – № 2. – С. 75-81.
22. *Носков С.И., Афонин М.В., Бычков Ю.А., Медведев А.П., Торопов В.Д.* Нелинейная регрессионная модель функционирования горно-металлургической компании // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 4 (112). – С. 59-68.

REFERENCES

1. *Feng Ding.* Combined state and least squares parameter estimation algorithms for dynamic systems, *Applied Mathematical Modelling,* 2014, Vol. 38, No. 1, pp. 403-412. DOI: 10.1016/j.apm.2013.06.007.
2. *Mario Novak, Predrag Horvat.* Mathematical modelling and optimisation of a waste water treatment plant by combined oxygen electrode and biological waste water treatment model, *Applied Mathematical Modelling,* 2012, Vol. 36, No. 8, pp. 3813-3825. DOI: 10.1016/j.apm.2011.11.028.
3. *Soh-Fong Lim, Yu-Ming Zheng, Shuai-Wen Zou, J. Paul Chen.* Characterization of Copper Adsorption onto an Alginate Encapsulated Magnetic Sorbent by a Combined FT-IR, XPS, and Mathematical Modeling Study, *Environmental Science & Technology,* 2008, Vol. 42, No. 7, pp. 2551-2556. DOI: 10.1021/es7021889.
4. *Gilberto González-Parra, Abraham J. Arenas, Benito M. Chen-Charpentier.* Combination of nonstandard schemes and Richardson's extrapolation to improve the numerical solution of population models, *Mathematical and Computer Modelling,* 2010, Vol. 52, No. 7–8, pp. 1030-1036. DOI: 10.1016/j.mcm.2010.03.015.
5. *S.G. Psakhie, E.V. Shilko, A.S. Grigoriev, S.V. Astafurov, A.V. Dimaki, A.Yu. Smolin.* A mathematical model of particle–particle interaction for discrete element based modeling of deformation and fracture of heterogeneous elastic–plastic materials, *Engineering Fracture Mechanics,* 2014, Vol. 130, pp. 96-115. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.04.034.
6. *Mohammad Moshref-Javadi, Ahmad Hemmati, Matthias Winkenbach.* A truck and drones model for last-mile delivery: A mathematical model and heuristic approach, *Applied Mathematical Modelling,* 2020, Vol. 80, pp. 290-318. DOI: 10.1016/j.apm.2019.11.020.
7. *Annelies De Meyer, Dirk Cattrysse, Jos Van Orshoven.* A generic mathematical model to optimise strategic and tactical decisions in biomass-based supply chains (OPTIMASS), *European Journal of Operational Research,* 2015, Vol. 245, No. 1, pp. 247-264. DOI: 10.1016/j.apm.2019.11.020.
8. *Bowen Wei, Liangjie Chen, Huokun Li, Dongyang Yuan, Gang Wang.* Optimized prediction model for concrete dam displacement based on signal residual amendment, *Applied Mathematical Modelling,* 2020, Vol. 78, pp. 20-36. DOI: 10.1016/j.apm.2019.09.046.
9. *Orazbayev B.B., Orazbayeva K.N., Utenova B.E.* Development of mathematical models and modeling of chemical engineering systems under uncertainty, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering,* 2014, Vol. 48, pp. 138-147. DOI: 10.1134/S0040579514020092.
10. *Serge Sutulo, C. Guedes Soares.* An algorithm for offline identification of ship manoeuvring mathematical models from free-running tests, *Ocean Engineering,* 2014, Vol. 79, pp. 10-25. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.01.007.
11. *Saenko I.B., Malikov A.V., Avramenko V.S., Yasinskiy S.A.* Neyrosetevaya model' diagnostirovaniya komp'yuternykh intsidentov na ob"ektakh kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury [Neural network model for diagnosing computer incidents at critical information infrastructure facilities], *Informatsiya i kosmos* [Information and Space], 2019, No. 3, pp. 77-84.
12. *Kropotov Yu.A., Proskuryakov A.Yu., Belov A.A., Kolpakov A.A.* Modeli, algoritmy sistemy avtomatizirovannogo monitoringa i upravleniya ekologicheskoy bezopasnosti promyshlennykh proizvodstv [Models, algorithms for an automated monitoring and management system for environmental safety of industrial production], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control, Communication and Security Systems], 2015, No. 2, pp. 184-197.

13. *Volkov I.A., Igumnov L.A., Volkov A.I., Yudintseva A.I.* Raschet resursnykh kharakteristik konstruktsionnykh splavov pri vzaimnom vliyanii ustalosti i dlitel'noy prochnosti materiala [Calculation of resource characteristics of structural alloys under the mutual influence of fatigue and long-term strength of the material], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Solid State Mechanics], 2023, No. 4, pp. 64-82.
14. *Semenov V.A., Morozov S.V., Il'in D.V.* Kombinirovannyy metod verifikatsii masshtabnykh modeley dannykh [Combined method for verification of large-scale data models], *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Transactions of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences], 2014, Vol. 26, No. 2, pp. 197-230.
15. *Baranovskiy A.M., Belozerov V.A., Opryshko D.I.* Kombinirovannaya model' protsessa otsenivaniya dostovernosti kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya kosmicheskikh apparatov v usloviyakh neopredelennosti [Combined model of the process of assessing the reliability of monitoring the technical condition of spacecraft under uncertainty], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [News of higher educational institutions. Instrument engineering], 2009, Vol. 52, No. 4, pp. 56-61.
16. *Mikhalevich I.F.* Strukturnyy analiz elementov mul'tiservisnykh setey svyazi [Structural analysis of elements of multiservice communication networks], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2007, No. 2, pp. 2-9.
17. *Noskov S.I.* Identifikatsiya parametrov kombinirovannoy kusochno-lineynoy regressionnoy modeli [Identification of parameters of a combined piecewise linear regression model], *Vestnik YUgorskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Yugra State University], 2022, No. 4 (67), pp. 115-119.
18. *Noskov S.I., Lonshakov R.V.* Identifikatsiya parametrov kusochno-lineynoy regressii [Identification of parameters of piecewise linear regression], *Informatsionnye tekhnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniya slozhnykh system* [Information technologies and problems of mathematical modeling of complex systems], 2008, No. 6, pp. 63-64.
19. *Noskov S.I., Khonyakov A.A.* Kusochno-lineynye regressionnye modeli ob"emov perevozki passazhirov zheleznodorozhnym transportom [Piecewise linear regression models of passenger transportation volumes by rail], *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society], 2021, No. 4 (40), pp. 80-89.
20. *Noskov S.I.* Kusochno-lineynaya proizvodstvennaya funktsiya pogruzki na zheleznodorozhnom transporte [Piecewise linear production function of loading on rail transport], *Elektronnyy setevoy politematicheskiy zhurnal "Nauchnye trudy KubGTU"* [Electronic online polythematic journal "Scientific Works of KubSTU"], 2022, No. 4, pp. 72-79.
21. *Noskov S.I., Zhukova M.S., Kirillova T.K., Kupitman Yu.O., Khonyakov A.A.* Utochnenie sposobov identifikatsii parametrov nekotorykh kusochno-lineynykh regressiy [Refinement of methods for identifying parameters of some piecewise linear regressions], Elektronnyy setevoy politematicheskiy zhurnal "Nauchnye trudy KubGTU" [Electronic online polythematic journal "Scientific Works of KubSTU"], 2023, No. 2, pp. 75-81.
22. *Noskov S.I., Afonin M.V., Bychkov Yu.A., Medvedev A.P., Toropov V.D.* Nelineynaya regressionnaya model' funktsionirovaniya gorno-metallurgicheskoy kompanii [Nonlinear regression model of functioning of a mining and metallurgical company], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2024, No. 4 (112), pp. 59-68.

Носков Сергей Иванович – Иркутский государственный университет путей и сообщения; e-mail: sergey.noskov.57@mail.ru; г. Иркутск, Россия; тел.: +79149022494; кафедра информационных систем и защиты информации; д.т.н.; профессор.

Беляев Сергей Вячеславович – Иркутский государственный университет путей и сообщения; e-mail: bsv2001@list.ru; г. Иркутск, Россия; тел.: +79041514500; кафедра информационных систем и защиты информации; магистрант.

Noskov Sergey Ivanovich – Irkutsk State Transport University; e-mail: sergey.noskov.57@mail.ru; Irkutsk, Russia; phone: +79149022494; the Department of Information Systems and Information Security; dr. of eng. sc.; professor.

Belyaev Sergey Vyacheslavovich – Irkutsk State Transport University; e-mail: bsv2001@list.ru; Irkutsk, Russia; phone: +79041514500; the Department of Information Systems and Information Security; master's student.

УДК 621.315.611 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-128-144

Н.К. Полуянович, Н.И. Светличный, О.В. Качелаев, М.Н. Дубяго

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В МИКРОСЕТЯХ С МЕХАТРОННОЙ ВЕТРО-ГЕНЕРАТОРНОЙ СИСТЕМОЙ

Рассмотрено влияние различных факторов на точность прогноза генерации ветроэнергетической установкой (ВЭУ). Определен оптимальный набор входных параметров (день, месяц, время, скорость ветра, температура воздуха, атмосферное давление и расчетная вырабатываемая мощность ВЭУ) для прогнозирования, обоснованы методы их обработки. Проведено исследование влияния воздействующих факторов на точность прогнозирования генерируемой мощности ВЭУ. Построены профили входных данных для прогнозирования электрогенерации ВЭУ. Рассмотрены особенности метеорологических условий за год, определены часто встречающаяся значения скорости ветра, и др., для выбора оптимальной ВЭУ. Показано, что метеорологических условия удовлетворяют паспортным требованиям выбранной для рассматриваемого региона ВЭУ. Рассмотрены нейросетевые (НС) модели для прогнозирования генерации мощности ВЭУ, выбрана оптимальная НС, построена структура и разработан алгоритм НС для прогнозирование генерируемой мощности ВЭУ. Разработанная математическая модель генерации мощности ВЭУ направлена на повышение точности и адаптивности благодаря учету ключевых динамических факторов (скорость и изменение направления ветра, температура и плотность воздуха и др.). Выбран комбинированный метод управления генерацией ВЭУ (MPPT + Pitch) обеспечивает баланс между эффективностью и безопасностью. На основании расчетной генерируемой мощности ВЭУ, и метеорологических условий в месте расположения нейросетевая модель показала высокую точность прогнозирования мощности ВЭУ. Показано, что выбранный тип ВЭУ сочетает в себе технологическую надежность, рентабельность и соответствие современным тенденциям ветроэнергетики. НС-модель позволяет поддерживать баланс между вырабатываемой и потребляемой электроэнергией, а, следовательно, повышает КПД, снижает паразитные потери в микросети, а также снижает износ оборудования.

Мехатронная система; микросеть; предиктивные технологии; нейронная сеть метрики, процессы управления энергосистемой.

N.K. Poluyanovich, N.I. Svetlichnyi, O.V. Kachelaev, M.N. Dubyago

NEURAL NETWORK METHOD OF PREDICTIVE CONTROL IN MICROGRIDS WITH MECHATRONIC WIND-GENERATOR SYSTEM

The influence of various factors on the accuracy of forecasting wind turbine generator (WTG) generation is considered. The optimal set of input parameters (day, month, time, wind speed, air temperature, atmospheric pressure and estimated power output of wind turbine) for forecasting is determined, and the methods of their processing are substantiated. The influence of influencing factors on the accuracy of forecasting the generated power of wind turbines was investigated. Profiles of input data for forecasting the power generation of wind power plants are constructed. The peculiarities of meteorological conditions for a year are considered, frequently occurring wind speed values are determined, etc., for the selection of an optimal wind turbine. It is shown that the meteorological conditions meet the passport requirements of the WTG selected for the region under consideration. Neural network (NN) models for forecasting the power generation of wind turbines are considered, the optimal NN is selected, the structure is built and the algorithm of NN for forecasting the generated power of wind turbines is developed. The developed mathematical model of wind power generation is aimed at improving accuracy and adaptability by taking into account key dynamic factors (wind speed and change in wind direction, air temperature and density, etc.). The combined wind turbine generation control method (MPPT + Pitch) is chosen to ensure a balance between efficiency and safety. The combined method of controlling the wind turbine generation (MPPT + Pitch) is chosen, which provides a balance between efficiency and safety. Based on the estimated generated power of wind turbines, and meteorological conditions at the location, the neural network model showed high accuracy in predicting the power of wind turbines. It is shown that the selected type of wind turbine combines technological reliability, cost-effectiveness and compliance with modern trends in wind energy. The NN model allows maintaining a balance between generated and consumed electricity, and, consequently, increases efficiency, reduces parasitic losses in the microgrid, and reduces wear and tear of equipment.

Mechatronic system; microgrid; predictive technologies; neural network metrics; power system control processes.

Введение. Мехатронная система ветрогенераторной установки – микросети могут работать как в единой сети с основными энергетическими системами, так и автономно. Мехатронная система как совокупность мехатронных модулей и узлов, синергетически связанных между собой, для выполнения функциональной задачи – обеспечения бесперебойной работы в изменяющихся условиях. Это единый комплекс электромеханических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный обмен энергией и информацией, объединённый общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта. Включает в себя ветрогенератор, блок управления, датчики, аккумуляторные батареи, инвертор и счётчик электроэнергии. Ветрогенератор собирает и преобразует энергию ветра в электроэнергию, блок управления распределяет её между аккумуляторами и внешней нагрузкой. Инвертор преобразует постоянный ток в переменный для внешней нагрузки и регулирует выходное напряжение.

Эффективность работы ветроэлектрической установки (ВЭУ) напрямую зависит от погодных условий, неопределенность которых требует использования искусственных нейронных сетей для точного прогнозирования выработки электроэнергии. Точное прогнозирование позволяет оптимизировать тактику эксплуатации, что может привести к снижению затрат на обслуживание и увеличению доходности от продажи электроэнергии.

Актуальность работы обусловлена решением проблемы снижения трат и повышения доходности от продажи электроэнергии.

Предмет исследований – алгоритмы нейросетевого управления, ветроэлектрическая установка.

Целью работы является разработка и исследование нейросетевого алгоритма предиктивного управления для повышения эффективности и устойчивости микросетей, включающих мехатронные ветрогенераторные системы.

Практическая применение состоит в точном краткосрочном и долгосрочном прогнозировании выработки электроэнергии ветроустановкой, выборе оптимальных входных параметров и структуры нейросети с применением оборудования серийного производства, которое позволяет обеспечить надежность и дешевизну.

Критерии выбора оптимальной ВЭУ. Для правильного выбора установки и её эффективного использования необходимо учитывать следующие параметры [1]:

- конструкция;
- место установки;
- мощность.

Основные различия горизонтально и вертикально осевых ВЭУ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные различия горизонтально и вертикально осевых ВЭУ

Тип конструкции ВЭУ	Диапазон КПД, %	Рабочий диапазон скорости ветра, м/с	Номинальная скорость ветра, м/с	Занимаемая площадь одной ВЭУ, отн. ед.	Средняя цена (млн руб./МВт)
Горизонтально осевая	45-50	3-25	11-15	1.5-3	15-20
Савониус	15-25	2-12	8-10	1	12
Дарье	30-40	4-20	12-15	0.8	18
Геликоидная	35-45	3-25	10-14	0.7	22
Vortex	10-20	3-15	8-12	0.5	8

По КПД горизонтальные ВЭУ лидируют (45–50%) благодаря аэродинамике лопастей, среди вертикальных лучший КПД у геликоидных (35–45%). По компактности вертикальные (особенно Vortex) требуют меньше места, горизонтальные занимают в 1.5–3 раза

больше площади. По цене вертикальные Vortex – самые дешевые (8 млн руб./МВт), но с низким КПД, горизонтальные же оптимальны по цене и качеству (15–20 млн руб./МВт). Горизонтальные лучше для открытых площадок с стабильным ветром, вертикальные же подходят для турбулентных условий (города, крыши зданий).

Для выбора оптимальной модели ВЭУ были использованы следующие критерии: минимальная скорость ветра, обеспечивающая максимальную вырабатываемую мощность, номинальную вырабатываемую мощность установки, срок службы, надежность и стоимость. Основываясь на этих критериях, выбрана Vensys V126-3.8 MW. Эта модель наиболее подходит для установки на ВЭС ростовской области. Так как среднегодовая скорость ветра на высоте 100 метров в ростовской области составляет 6-8, то минимальная скорость ветра, обеспечивающая максимальную вырабатываемую мощность, этой установки позволит выработать наибольшее количество электроэнергии, повысив стабильность и качество энергоснабжения региона в целом. Высокая надежность снизит траты на техническое обслуживание, а высокий срок службы обеспечит регион энергией на многие годы. На основании проведённого исследования установлено, что наземная горизонтально-осевая ВЭУ большой мощности является оптимальным вариантом для заданных условий эксплуатации. Данный выбор обусловлен:

1. Высокой энергоэффективностью (горизонтальные ВЭУ демонстрируют лучший коэффициент использования ветра по сравнению с вертикальными).
2. Экономической целесообразностью (наземные установки требуют меньших затрат на монтаж и обслуживание, чем морские или плавающие аналоги).
3. Масштабируемостью (установки большой мощности обеспечивают значительную выработку энергии при рациональном использовании земельных ресурсов).

Таким образом, выбранный тип ВЭУ сочетает в себе технологическую надежность, рентабельность и соответствие современным тенденциям ветроэнергетики.

Робототехнический подход к управлению генерацией в микросетях. Робототехнический подход к управлению генерацией в микросетях подразумевает использование интеллектуальных алгоритмов и адаптивных методов для оптимизации работы локальных энергетических систем.

Современная ВЭУ в микросетях представляет собой робототехническую систему, сочетающую в себе мехатронные исполнительные устройства, систему датчиков и интеллектуальные алгоритмы управления, обеспечивающие автономную работу в изменяющихся условиях. К ключевым аспектам ВЭУ как робототехнической системы относится:

- Мехатронная архитектура: – сервоприводы поворота лопастей; – электрогенератор с регулируемой скоростью; – система двигателей для ориентации на ветер (поворот башни в зависимости от направления ветра).
- Интеграция в микросеть. ВЭУ – часть киберфизической системы, где: – обмениваются данными с другими источниками (СЭС, дизель-генераторы) через SCADA; – учувствуют в балансировке мощности (через умные инверторы).
- Интеллектуальные функции: – прогнозирование: интеграция систем машинного обучения с ВЭУ для предсказания выработки на основе метеорических данных; – адаптация: режимы работы меняются в реальном времени в зависимости от состояния сети (например, при переходе на островной режим).
- Автоматизированное управление. Сбор данных: ВЭУ использует датчики и сенсоры (анемометры, гироскопы, датчики напряжения) и алгоритмы обратной связи для: – автоматического позиционирования лопастей для получения оптимального угла атаки; – слежения за направлением ветра; – защиты от перегрузок (торможение при штормовом ветре).

Таким образом, **с**овременные ВЭУ представляют собой полноценную робототехническую систему, объединяющую умные датчики, мехатронные исполнительные механизмы и алгоритмы управления автономной работы агрегата. Как робот, установка анализирует ветер сенсорами, адаптирует положение лопастей сервоприводами, положение гондолы электродвигателями, прогнозирует генерацию и потребление через НС и самостоятельно поддерживает энергобаланс в микросети – особенно в островном режиме (работе без подключения к централизованной сети). Способность проводить самодиагностику, наличие обратной связи и принятию решений без оператора делает ВЭУ не просто генератором, а интеллектуальным энергороботом.

Структурная схема разрабатываемой ВЭУ. Структурная схема подключения ВЭУ к микросети представлена на рис. 1. При скоростях от 3 м/с до 25 м/с воздействие ветра на ветроэнергетическую установку (ВЭУ) приводит к генерации переменного тока с различным уровнем напряжения. Частота этого тока постоянно колеблется в диапазоне от 10 Гц до 100 Гц. Затем многоуровневый управляемый выпрямитель преобразует переменный ток с меняющейся частотой, после чего он направляется к клеммам аккумуляторной батареи для зарядки. Для контроля уровня заряда аккумуляторной батареи используется регулятор напряжения. Если напряжение превышает заданный предел, при помощи тиристорного ключа осуществляется перевод нагрузки с аккумулятора на балластное сопротивление. Когда напряжение падает до определенной отметки, СУ вновь переключает режим на подзарядку аккумулятора. Гибридные аккумуляторные батареи играют ключевую роль не только в сохранении электрической энергии в режиме временного хранения, но также помогают поддерживать и регулировать напряжение, которое производится ветроэнергетическими установками. Многоуровневый управляемый инвертор получает регулируемое напряжение от выпрямителя, которое варьируется в зависимости от уровня заряда аккумуляторной батареи. Если потребляемый ток превосходит генерируемую ветроэнергетическим устройством мощность, аккумуляторы начинают разряжаться. В обратной ситуации инициируется процесс зарядки батарей.

Рис. 1. Структурная схема ВЭУ с подключением к микросети

Проведено сравнение разработанной системы подключения ВЭУ к микросети с традиционным решением, табл. 2.

Таблица 2

Системы подключения ВЭУ к микросети

Система / Критерии	Разрабатываемая	Традиционная
КПД преобразователей	98-99%	92-95%
Интеграция ИИ	+	-
Реакция на скачки тока	10-100 мс	500 мс – 1 сек
Срок службы АКБ	15+ лет	5-7 лет

Робототехническая система – это комплекс включающий: исполнительные механизмы, датчики, систему управления, обратную связь (коррекцию работы в реальном времени). ВЭУ, входящую в микросеть, можно с уверенностью назвать робототехнической системой, так как она обладает следующими преимуществами:

♦ Максимальная энергоэффективность достигается за счет многоуровневых преобразователей, имеющие КПД 98-99% по сравнению со стандартными двухуровневыми. А также применением гибридной АКБ ($LiFePo_4$ + суперконденсаторы) компенсирующей скачки генерации без перегрузки батареи.

♦ Умное управление генерацией. Благодаря СУ SCADA с возможностью интеграции ИИ появляется возможность прогнозировать выработку, основываясь на метеорологических данных и состоянии сети. Также СУ следит за балансом между генерацией и потреблением.

♦ Стабильность в островном режиме. Инвертор формирует напряжение/частоту соответствующее внешней сети. Балластная нагрузка мгновенно утилизирует избыток энергии. Масштабируемость под микросеть (совместимость с другими источниками электроэнергии, СЭС, дизель-генераторами).

Обзор методов и алгоритмов управления ВЭУ. Современные ВЭУ претерпевают значительные изменения благодаря улучшениям в механической конструкции и электронных управляющих схемах. Одни из них функционируют при стабильных скоростях вращения ротора, достигаемых за счет адаптации обмоток генератора или корректировки передаточных чисел в мультипликаторе. В других моделях применяется переменная частота вращения, регулируемая изменением размеров или формы ротора, а также модификацией угла подхода ветрового потока. Это свидетельствует о появлении и внедрении новых подходов к управлению ветрогенераторами, используя регулятор мощности или адаптируя лопасти. Базовые методы управления генерацией горизонтальных двух и трёхлопастных ВЭУ описан в работе [2]. В табл. 3 приведена классификация методов управления генерацией ВЭУ.

Таблица 3

Классификация методов управления генерацией ВЭУ

Метод управления	Область применения
Стабилизация мощности через постоянную частоту вращения	Малые ВЭУ (<10 кВт)
Ступенчатое регулирование мощности	Сетевые ВЭУ (50-500 кВТ)
MPPT (переменная частота вращения)	Автономные системы, гибридные ВЭУ
Pitch-control (управления углом атаки лопастей	Промышленные ВЭУ (1+ МВт)
Комбинированный (MPTT + Pitch)	Современные ВЭУ (3+ МВт)

Таким образом, рассмотренные методы управления генерацией ВЭУ показали, что:

♦ метод стабилизации мощности через постоянную частоту вращения – структурно простой, недорогой, но с низкой эффективностью. Подходит для маломощных ВЭУ в стабильных ветровых условиях;

♦ ступенчатое регулирование мощности – улучшает диапазон рабочих скоростей ветра за счет переключения обмоток. Оптимален для сетевых ВЭУ средней мощности;

♦ MPPT (переменная частота вращения)– максимизирует выработку энергии, адаптируясь к изменчивому ветру. Требует точной электроники, но окупается за 2–5 лет;

♦ Pitch-control (управление углом атаки лопастей) – защищает ВЭУ от перегрузок и продлевает срок службы. Особенно важен в регионах с сильными ветрами и штормами;

♦ Комбинированный метод управления (MPPT + Pitch) – обеспечивает баланс между эффективностью и безопасностью. Лучший выбор для современных мощных ВЭУ, несмотря на высокую стоимость.

Математическая модель генерации ВЭУ. Функционирование системы управления ветрогенератором и его спецификации зависят от множества воздействующих факторов. Важно создать модель генерации, включающую не только доминирующее воздействия (скорость ветра), но и второстепенные (плотность воздуха, температуру, атмосферное давление, направление ветра) учет которых значительно повысит точность модели.

Расчет генерируемой мощности ВЭУ производится по формуле 1.

$$P_{\text{ген}} = \frac{C_p * \rho * A}{2} * V^3 * cos^3(a), \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха кг/м^3; A – ометаемая поверхность ветроколеса м^2; C_p – коэффициент использования ветра; V – скорость ветра м/с; a – угол изменения направления ветра, рад.

Из формулы 1. видно, что при расчете генерируемой мощности ВЭУ учитывается не только доминирующее воздействие (скорость ветра), но и другие факторы, такие как направление ветра, плотность воздуха, конструктивные параметры ВЭУ. Плотность воздуха рассчитывается по формуле 2. Мендедеева-Клайперона.

$$\rho = p * \frac{M}{R * T}, \quad (2)$$

где p – давление воздуха; M = 28.98 г/моль – молярная масса воздуха; R = 8.314 $\frac{\text{Дж}}{\text{моль*К}}$ – универсальная газовая постоянная; T – температура воздуха в Кельвинах.

Величина ометаемой поверхности ветра колеса рассчитывается по формуле 3.

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}, \quad (3)$$

где D – диаметр ветроколеса выбранной ВЭУ.

Коэффициент использования энергии ветра – это показатель эффективности преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию ротора, рассчитывается по формуле 4. По закону Беца теоретический максимум коэффициента использования ветра C_p = 0.593.

$$C_p = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{ветра}}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{мех}}$ – механическая мощность на валу ротора, Вт; $P_{\text{ветра}}$ – мощность ветрового потока, Вт.

Мощность ветрового потока рассчитывается по формуле 5.

$$P_{\text{ветра}} = 0{,}5 * \rho * A * V^3. \quad (5)$$

Обычно при расчете генерируемой мощности ВЭУ используют типовые значения коэффициента использования ветра:

- для маленьких ВЭУ: C_p = 0.25-0.35;
- для промышленных ВЭУ: C_p = 0.40-0.45.

Математическая модель генерации, учитывающая множества воздействующих факторов представлена системой 6.

$$\begin{cases} P_{\text{ген}} = \frac{C_p * \rho * A}{2} * V^3 * cos^3(a) \\ \rho = p * \frac{M}{R * T} \\ A = \frac{\pi * D^2}{4} \\ C_p = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{ветра}}} \\ P_{\text{ветра}} = 0{,}5 * \rho * A * V^3. \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, разработанная математическая модель генерации мощности ВЭУ направлена на повышение точности и адаптивности благодаря учету ключевых динамических факторов:

- модель учитывает изменение плотности воздуха с высотой, что позволяет точнее предсказывать мощность при переменном ветре;

- в отличие от паспортной кривой (стандартные условия: 15°С, 1 атм), модель адаптируется к локальным климатическим условиям;
- модель учитывает не только скорость, но и изменение направления ветра.

Моделирование нейросетевого прогнозирования мощности. Для моделирования нейросетевого прогнозирования вырабатываемой мощности ВЭУ проведем анализ воздействующих факторов**.** В работе [3] для прогнозирования скорости и направления ветряного потока использовалась база почасовых данных скорости и направления ветра за 36 лет. Лучший результат показала ИНС, обученная на выборке данных за 10 лет. Входная выборка состоит из следующих параметров: скорость ветра, направление ветра. В статье [4] для прогнозирования выработки ветроустановки рассматривалась выборка данных, состоящая из следующих параметров: дата и время; вырабатываемая активная мощность, кВт; скорость ветра на высоте гондолы; расчетное значение мощности при текущем значении ветра согласно паспортным данным, кВт; направление ветра. В [4] использовал выборку за 4 года с 10-ти минутным шагом. В работе [5] для прогнозирования выработки электроэнергии ветроэнергетической установкой использовалась следующие исходные данные: дата и время, выработка электроэнергии, кВт; скорость ветра, м/с; направление ветра, град.; атмосферное давление, атм; температура воздуха. Выборка состояла из данный за 1 год. В статье [6] на вход подается две переменные: скорость ветра и коэффициент мощности ВЭУ, полученного из паспортных данных ветроустановки. В статье [7] автор применяет для прогнозирования мощности ветра на целевой ветроустановке данные влияния соседних ВЭУ на целевую, а также историческую мощность ветра на соседних турбинах. В работе [8] прогнозирование электрогенерации ветроустановки производилось на основе следующих входных параметров: скорость ветра, температура, давление и вырабатываемая мощность ветроустановкой. В работе [9] для прогнозирования мощности ветра на вход нейросети, оптимизированной алгоритмом “кошачьего рысканья”, подается выборка, состоящая из следующих параметров: скорость ветра, температура, давление и плотность воздуха. В табл. 4 приведены результаты исследования влияния воздействующих факторов на точность прогнозирования генерируемой мощности ВЭУ.

Проведено исследование влияния воздействующих факторов на точность прогнозирования генерируемой мощности ВЭУ. Основным фактором является скорость ветра, она дает основную точность прогноза, так как генерация мощности ВЭУ напрямую зависит от ветра, но использование исключительно доминирующего фактора дает кратно больший процент ошибки, по сравнению с системой прогнозирования, учитывающей и второстепенные факторы. Анализируя данные таблицы 8, можно сказать, что обеспечение высокой точности прогнозирования выработки электроэнергии ВЭУ требует использования следующих входных параметров: дата, время, скорость ветра, температура воздуха, атмосферное давление, вырабатываемая ВЭУ мощность.

Таблица 4

Влияние воздействующих факторов на точность прогнозирования

Учет входных (воздействующих) параметров на ВЭУ	Погрешность прогноза, %
Скорость и направление ветра	8.86
Время, дата, скорость и направление ветра, расчетная и вырабатываемая мощность ВЭУ	2.6
Время, дата, скорость и направление ветра, вырабатываемая мощность, атмосферное давление, температура воздуха	1.5
Скорость ветра и коэффициент мощности ВЭУ	7.5
Влияние соседних ВЭУ на целевую, мощность ветра соседних ВЭУ	1.02
Скорость ветра, вырабатываемая мощность, атмосферное давление, температура воздуха	3.6
Скорость ветра, атмосферное давление, температура воздуха, плотность воздуха	0.8

Для нейросетевого прогнозирования выработки электроэнергии была выбрана Каменская ВЭС, расположенная в Ростовской области вблизи города Каменск-Шахтинсий. На территории данной ВЭС были собраны необходимы для прогнозирования входные данные за один год с временным интервалом сбора данных в 1 час. Анализ профиля скорости ветра на высоте 100 метров за 2023 год показал пиковую скорость ветра, равную 18 м/с, что меньше максимальной допустимой для ВЭУ горизонтального типа (25 м/с). Также видно снижение средней скорости ветра в весенний и летний сезоны, и рост в осенний и зимний сезоны.

На рис. 2 представлена гистограмма распределения скорости ветра по частоте встречаемости.

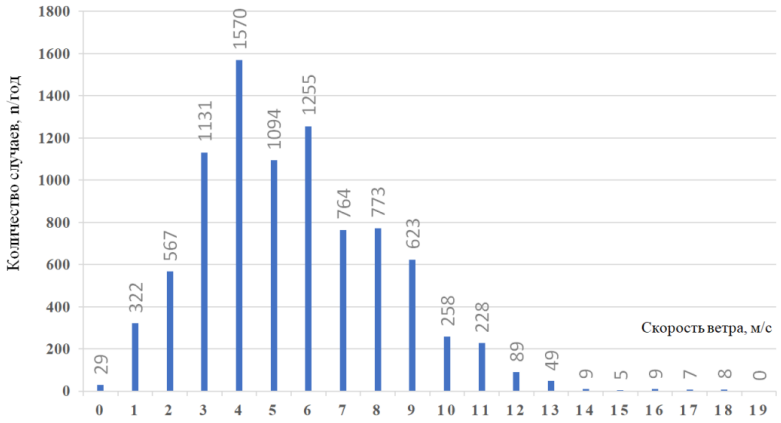


Рис. 2. Гистограмма распределения скорости ветра по частоте встречаемости

Анализ: На гистограмме распределения скорости ветра по частоте встречаемости видны наиболее часто встречающиеся значения скорости ветра – 4, 6 м/с. Рассматривая диапазон наиболее часто встречающихся скоростей ветра (от 2 до 9 м/с), среднее значение скорости будет 5.5 м/с, что в среднем соответствует генерации 500 кВт*час.

Для сравнения паспортной и расчетной генерируемой ВЭУ мощности на рис. 3 представлены наложенные друг на друга.

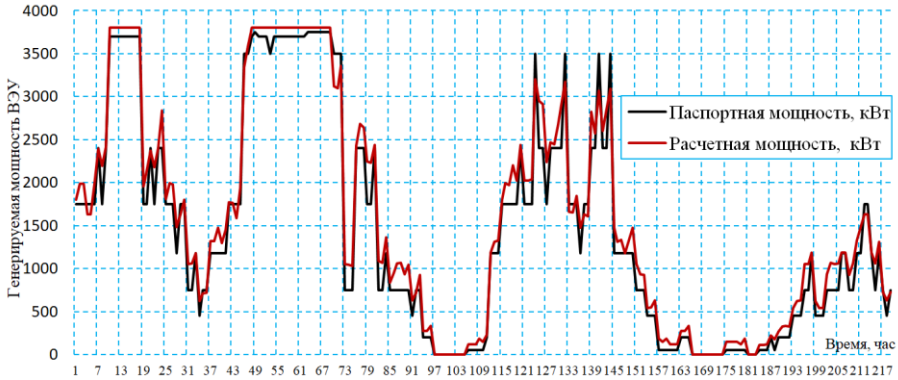


Рис. 3. Расчетная и паспортная генерируемая мощность ВЭУ

Анализ графиков вырабатываемой мощности ветроэлектрической установки (ВЭУ) и паспортной генерируемой мощности характеристики ветроагрегата (основанной только на доминирующем факторе – скорости ветра) рис. 3, показал, что паспортная кривая имеет более ступенчатый характер, так как она игнорирует второстепенные воздействия. Проведено сравнение, отличие этих двух кривых подтверждает важность учета всех воздействующих факторов в прогнозировании генерируемой мощности ВЭУ. Определен

оптимальный набор входных параметров (день, месяц, время, скорость ветра, температура воздуха, атмосферное давление и расчетная вырабатываемая мощность ВЭУ) для прогнозирования, обоснованы методы их обработки. Построены кривые собранных входных данных для прогнозирования электрогенерации ВЭУ. Рассмотрены особенности погодных условий за 2023 год в Каменск-Шахтинске, также были определены: наиболее часто встречающаяся скорость ветра, средняя скорость ветра за год.

Таким образом, полученные результаты служат основой для разработки нейросетевой модели в следующей главе.

Выбор нейросети для прогнозирования мощности ВЭУ. В работе [3] для прогнозирования скорости и направления ветрового потока исследовалась глубокая нейронная сеть с различными структурами. Использовалась метрика MAE (Mean Absolute Error Loss), а функции потерь Mini batch Gradient Descent (мини-пакетный градиентный спуск) в качестве метода оптимизации. В работе [4] применяется статистический гибридный метод прогнозирования ветра (SHWIP). Модель основана на динамической кластеризации погодных явлений в соответствии с их значимостью в производстве электроэнергии. При помощи системы SCADA снимаются необходимые ретроспективные данные ВЭУ и на их основе строится прогноз. В работе [10] для прогнозирования выработки электроэнергии ветроустановкой использовалась искусственная нейронная сеть. Наилучший результаты получен при использовании категориального бустинга со следующими значениями гиперпараметров: шаг обучения – 0.235, максимальная глубина деревьев – 9; число деревьев – 50. В работе [5] для прогнозирования выработки электроэнергии ветроэнергетической установкой использовалась рекуррентная нейронная сеть, которая состоит из четырех слоев: первый предназначен для ввода входных параметров, два скрытых слоя (I и II) предназначены для вычислений, и, состоящий из одного нейрона, выходной слой для формирования прогнозного значения. Входной слой содержит пять нейронов, в соответствии с количеством входных параметров. В скрытых слоях содержится 32 нейрона. Наилучший результат РНС показала с функцией активации ReLU. В статье [11] сравниваются два метода прогнозирования генерации ветроэлектростанции, метод полиномиальной регрессии и искусственной нейронной сети. ИНС имеет 4 слоя, из которых: один состоит из четырех нейронов, два скрытых слоя состоят из 16 нейронов и выходной слой из одного нейрона. В качестве функции распределения использовалась функция Гаусса. Исследование проводилось с использованием функции активации – Rectifier. Обучение составляло 10 эпох. Исследования показали, что метод полиномиальной регрессии значительно хуже прогнозирует выработку ВЭС по сравнению с ИНС (7.89% к 1.02%). Но метод полиномиальной регрессии позволяет понять значимость отдельных параметров для прогнозирования генерации электроэнергии ветроэлектростанциями. В статье [6] реализована система нечеткого вывода на основе пятислойной нейронной сети прямого распространения. На вход подается две переменные, с тремя термами каждая. В статье [7] автор применяет гибридный метод прогнозирования мощности ветра, основанный на следующих двух методах: пространственно-временного анализа и глубокой остаточной сети. Первый метод применяется для изучения исторических данных о мощности ветра как от целевой ветроустановки, так и от соседних. Результат применения пространственно-временного анализа – графическая структура с корреляциями мощности ветра между выбранными ВЭУ. Далее глубокая остаточная сеть рассматривает полученные из пространственного-временного анализа данные влияния соседних ветроустановок на целевую и величины мощности ветра на соседних ВЭУ. В работе [8] применяется прогнозирование выработки электроэнергии ветроэлектростанцией при помощи ИНС. 70% выборки данных идет на обучение, 30% – на проверку сети. В исследовании использовалась следующая структура ИНС: один входной слой, состоящий из 4-х нейронов, один скрытый слой из 10 нейронов, и один выходной слой из 1 нейрона. В статье [9] реализована система прогнозирования скорости ветра с оптимизацией типа “кошачий рой” (CSO). Сеть состоит из входного слоя с тремя нейронами, скрытого слоя из 8 нейронов и выходного слоя из одного нейрона. В качестве функции активации выходного слоя используется puerlin, скрытого слоя – tansig. Применение CSO значительно снижает время итерации

нейронной сети. В работе [12] автор прогнозирует скорость ветра для дальнейшего преобразования в мощность, генерируемую ветроустановкой. Основным фактором, влияющим на мощность ВЭУ является текущая скорость ветра, это следует из математической зависимости мощности от метеоусловий. Так как зависимость между мощностью и скоростью ветра нелинейная и имеет кубическое значение для повышения точности данный рекомендуется использовать характеристику мощности от завода-изготовителя, предварительно проанализировав данные скорости ветра при помощи вейвлет-анализа. Прогноз осуществлялся с использованием регрессионной модели на основе нечеткой логики по методу Такаги-Сугено. В статье [13] рассмотрены методы анализа и обработки входных данных для прогнозирования электрогенерации ВЭУ с использованием ИНС. Лучший результат показал аппарат дискретного вейвлет-преобразования, так как он позволяет рассмотреть не только во временной, но и в частотных плоскостях. Наиболее подходящей для реализации данного метода является ИНС с обратным распространение ошибок.

Исходя из того, что критериями выбора ИНС [14] были: высокая точность, быстрота обучения и низкая сложность структуры НС, наиболее подходящей выбрана ИНС многослойный персептрон с обратным распространением ошибки. Этот метод показал самую высокую точность и скорость обучения.

На рис. 4 представлена разработанная структура нейросети для прогнозирования [15, 16] генерации мощности ВЭУ.

Обучение персептрона с использованием метода обратного распространения ошибки включает две ключевые фазы. На первом этапе, сигнал напрямую проходит через слои нейронной сети, что позволяет вычислить значение ошибки на выходе. Затем, в ходе второй фазы, происходит адаптация весов посредством обратного распространения градиента ошибки. Этот алгоритм, применяемый в рамках обучения с учителем (англ. supervised learning), направлен на уменьшение разницы между фактическими результатами сети и заданными целями, основываясь на минимализации функции ошибки. Под обучение с учителем подразумевается метод машинного обучения, при котором нейронная сеть обучается на размеченных данных.

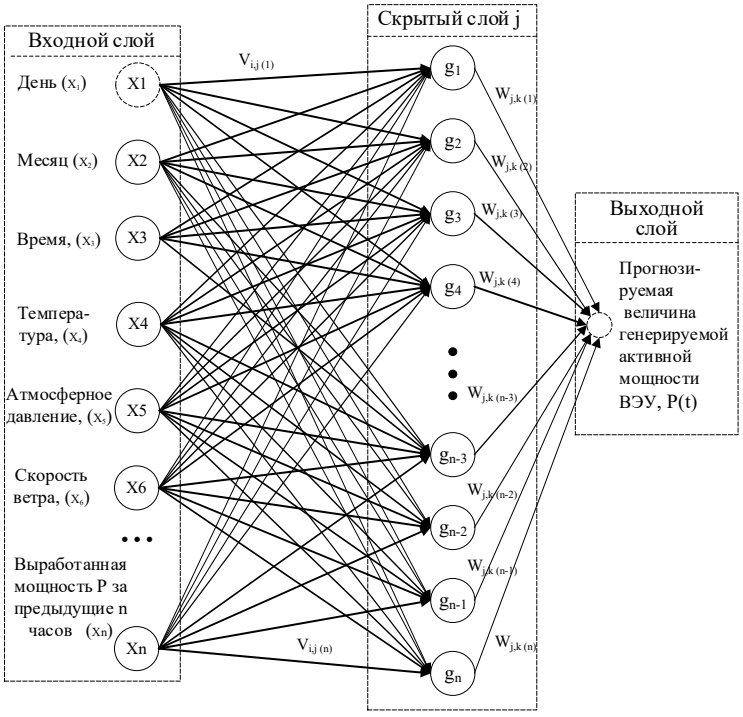


Рис. 4. Структура нейросети для прогнозирования генерации мощности ВЭУ

Математическая основа алгоритма базируется на применении правила цепочки (chain rule) для вычисления частных производных функции ошибки по весам сети. Правило цепочки – это метод вычисления производной сложных функций путем разложения ее на элементарные звенья. Если функция y зависит от x через промежуточную переменную u, то производная функции y по x представлена в формуле 7.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{du} * \frac{du}{dx}. \quad (7)$$

Применение этого правила в задаче частных производных функции ошибки по весам сети представлено в формуле 8.

$$\frac{dE}{dw_{ij}} = \frac{dE}{do_j} * \frac{do_j}{dnet_j} * \frac{dnet_j}{dw_{ij}}, \quad (8)$$

где E – функция ошибки (например MSE); w_{ij} – вес связи между нейроном i и j; o_j – выход нейрона j; net_j – взвешенная сумма входов; $\frac{dE}{do_j}$ – градиент ошибки от последующих слоёв (передается к предыдущим слоям); $\frac{do_j}{dnet_j}$ – производная функции активации; $\frac{dnet_j}{dw_{ij}} = o_i$ – вход предыдущего нейрона.

Это позволяет адаптировать веса через все слои, передавая градиент ошибки с последнего слоя к первому в процессе каждой итерации, опираясь на методы градиентного спуска. Выбор подходящей функции активации, такой как сигмоидальная функция или ReLU, критичен, так как она добавляет необходимую нелинейность и позволяет вычислять производные. Чтобы избежать переобучения, применяются различные стратегии регуляризации, включая L2-норму или метод dropout. Такой подход оказывается весьма эффективным прогнозировании выработки электроэнергии ВЭУ.

Нейросетевое управление ВЭУ [17–19] – это ключевой инструмент для оптимизации работы микросети, дающий возможность динамически согласовывать генерацию и потребление [20]. Баланс мощности в микросети с нейросетевым управлением обеспечивается благодаря НС-алгоритму для прогнозирования выработки электроэнергии ВЭУ, рис. 5.

Рис. 5. Блок-схема нейронной сети

Таким образом, рассмотрены НС для прогнозирования генерации мощности ВЭУ, выбрана оптимальная НС, построена структура и разработан алгоритм выбранной НС. НС-модель позволяет поддерживать баланс между вырабатываемой и потребляемой электроэнергией, а следовательно, повышает КПД, снижает паразитные потери в микросети, а также снижает износ оборудования.

Результаты прогнозирования генерируемой мощности ВЭУ. Проведено исследование точности нейросетевого прогнозирования вырабатываемой мощности ВЭУ на различных временных горизонтах:

- краткосрочных (24–48 часов);
- среднесрочных (неделя);
- долгосрочных (месяц, полгода).

Для проверки точности прогнозирования будут использованы следующие метрики:

1. RMSE – среднеквадратичная ошибка (Root Mean Square Error);
2. sMAPE – симметричная средняя абсолютная процентная ошибка (Symmetric Mean Absolute Percentage Error);
3. Energy-Based MAE – средняя абсолютная ошибка на энергетической основе (Energy-Based Absolute Error.)
4. RMSE – среднеквадратичная ошибка, которая рассчитывается по формуле 9.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (9)$$

где y_i – фактическое значение генерируемой мощности ВЭУ; $\hat{y}_i$ – прогнозируемое значение генерируемой мощности ВЭУ; N – количество наблюдений.

sMAPE – симметричная средняя абсолютная процентная ошибка, которая рассчитывается по формуле 10. sMAPE измеряет среднее отклонение прогноза от факта в процентах. Чем ближе к 0%, тем точнее модель. Изначально планировалось использовать MAPE, но из-за неспособности работы с выборками которые содержат 0, пришлось сменить ее на полностью устойчивую к нулевым данным sMAPE.

$$sMAPE = \frac{100\%}{N} * \sum_{i=1}^{N} \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{(|y_i| + |\hat{y}_i|)/2}, \quad (10)$$

Energy-Based MAE –

То модификация стандартной MAE, адаптированная для энергетических прогнозов. Применена для оценки точности прогнозирования суммарной выработки ВЭУ и рассчитывается по формуле 11.

$$\text{Energy} - \text{Based MAE} = \frac{|\sum y_i - \sum \hat{y}_i|}{\sum y_i} * 100\%, \quad (11)$$

Краткосрочное прогнозирование (24-48) часов. На рис. 6 представлена расчетная и прогнозируемая генерируемая мощность ВЭУ на горизонте 24 часа.

Рис. 6. Расчетная и прогнозируемая генерируемая мощность ВЭУ за 24 часа

Анализ: рис. 6 подтверждает наблюдение о повышении ошибки в устойчивом режиме генерации. Также по графику видно повышение точности с ростом генерируемой мощности.

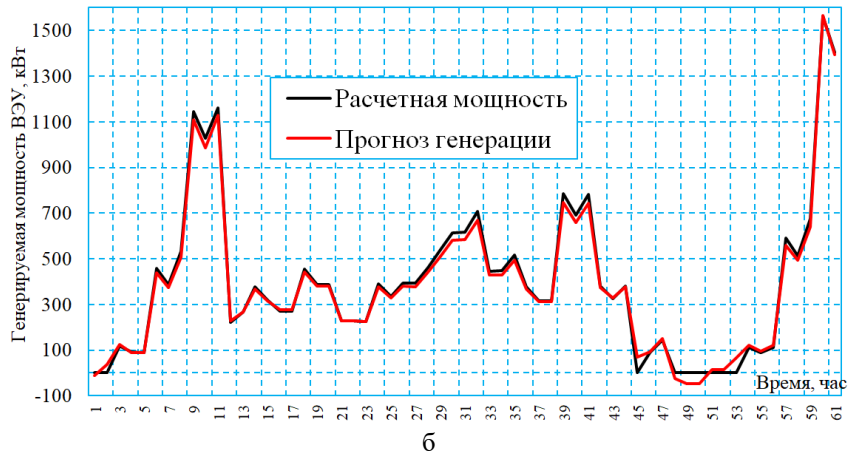
В табл. 4 представлены итоги краткосрочного прогнозирования электрогенерации ВЭУ (2 прогноза на 24 часа и на 48 часов).

Таблица 4

Итоги краткосрочного прогнозирования электрогенерации ВЭУ

Горизонт прогноза	Метрики		
	RMSE, кВт	sMAPE, %	Energy-Based MAE, %
1. 24 часа	2.9	4.3	0.99
2. 24 часа	0.83	1.5	0.3
1. 48 часов	6.5	9.5	7.3
2. 48 часов	8.3	1.8	0.59

а



б

Рис. 7. Расчетная и прогнозируемая генерируемая мощность ВЭУ за 672 часа

Анализ: На рис. 7 также наблюдается стабильно высокая точность прогноза. Приблизим небольшой участок графика для более качественного анализа. Если сравнивать вырезанный участок с рис. 7,б и 7,а, можно сказать, что этот участок спрогнозирован намного точнее, можно наблюдать меньшее количество отклонений.

Результаты краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования (по 2 для каждого горизонта прогнозирования) представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты нейросетевого прогнозирования генерации ВЭУ

Горизонт прогноза	Метрики		
	RMSE, кВт	sMAPE, %	Energy-Based MAE, %
1. 24 часа	2.9	4.3	0.99
2. 24 часа	0.83	1.5	0.3
1. 48 часов	6.5	9.5	7.3
2. 48 часов	8.3	1.8	0.59
1. неделя	16.2	3.02	1.6
2. неделя	1.2	1.5	0.5
1. месяц	9.98	5.36	1.04
2. месяц	40.5	12.5	2.05
1. полгода	2.76	6.2	0.8

Из табл. 5 следует, что:

- ♦ разработанная НС-модель прогнозирования при различных горизонтах прогноза позволяет достичь высокую точность;
- ♦ в сочетании с высокой скоростью обучения НС, подтверждается правильность выбора типа НС, для прогнозирования электрогенерации ВЭУ;
- ♦ с увеличением горизонта прогноза влияние снижение точности при низких генерируемых мощностях сглаживаются на фоне высокоточного прогноза других временных участках;
- ♦ точность прогнозирования снижается, при попытке НС отобразить нулевые и предельные показатели выработки ВЭУ;
- ♦ наименьшая ошибка наблюдается в выборках, в которых либо отсутствуют нулевые показатели генерации, либо их крайне мало.

Заключение:

1. Рассмотрены различные наборы влияющих факторов на точность прогноза генерации ВЭУ. Проанализированы погодные условия в зоне расположения ветроэнергетической установки, включая наиболее распространённую и среднегодовую скорость ветра.
2. Рассмотрены нейросетевые модели для прогнозирования генерации мощности ВЭУ, выбрана оптимальная НС, построена структура и разработан алгоритм для прогнозирования генерируемой мощности ВЭУ, определен оптимальный набор входных параметров и обоснованы методы их предобработки.
3. Точный прогноз мощности ВЭУ обеспечен за счет учета расчетных показателей генерируемой мощности и погодных условий в месте установки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шепелев А.О., Артамонова Е.Ю.* Классификация современных ветроэнергетических установок по мощности // Молодой ученый. – 2016. – № 17. – С. 92-96.
2. *Фазылова А.Р.* Разработка блоков управления для ветрогенераторов: специальность 47.04.01. «Философия»: дисс. … д-ра филос. наук. – Алматы: Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева 2024. – 121 с.
3. *Орлов Д.В.* Разработка и исследование методов предиктивного управления мощностью ветроэлектростанций в электроэнергетических системах: специальность 2.4.3 «Электроэнергетика»: дисс. … канд. техн. наук. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2023. – 224 с.
4. *Özkan, Mehmet & Karagoz, Pinar*. (2019). Data Mining Based Upscaling Approach for Regional Wind Power Forecasting: Regional Statistical Hybrid Wind Power Forecast Technique (RegionalSHWIP) // IEEE Access. – P. 1-1. – 10.1109/ACCESS.2019.2956203.
5. *Горшенин А.Ю., Денисова Л.А.* Прогнозирование выработки электроэнергии ветроэлектростанцией с применением рекуррентной нейронной сети // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – № 4. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-vyrabotki-elektroenergii-vetroelektrostantsiey-s-primeneniem-rekurrentnoy-neyronnoy-seti (дата обращения: 20.02.2025).

6. *Зубова Н.В.* Прогнозирование вырабатываемой мощности ветроэнергетической установки с помощью нечетких нейронных сетей // Проблемы науки. – 2016. – № 32 (74). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-vyrabatyvaemoy-moschnosti-vetroenergeticheskoy-ustanovki-s-pomoschyu-nechetkih-neyronnyh-setey (дата обращения: 22.02.2025).
7. *Li Huajin.* Short-Term Wind Power Prediction via Spatial Temporal Analysis and Deep Residual Networks // Frontiers in Energy Research. – 2022. – 10. 920407. 10.3389/fenrg.2022.920407.
8. *Jamii Jannet & Mansouri Majdi & Trabelsi Mohamed & Mimouni Mohamed & Shatanawi Wasfi.* Effective artificial neural network-based wind power generation and load demand forecasting for optimum energy management // Frontiers in Energy Research. – 2022. – 10. 898413. 10.3389/fenrg.2022.898413.
9. *Liu Shu & Wang Lei & Jiang Hongliang & Liu Yan & You Hongyu*. Wind Farm Energy Storage System Based on Cat Swarm Optimization–Backpropagation Neural Network Wind Power Prediction // Frontiers in Energy Research. – 2022. – 10. 10.3389/fenrg.2022.850295.
10. *Харлашкин Д.А.* Прогнозирование выработки ветроэнергетических установок на основе методов искусственного интеллекта: специальность 1.4.4 «Прикладная математика». – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2024. – 83 с.
11. *Горшенин А.Ю., Васина Д.И.* Сравнение используемых методов при прогнозировании выработки электроэнергии ветроэлектростанциями // МСиМ. – 2023. – № 3 (67). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-ispolzuemyh-metodov-pri-prognozirovanii-vyrabotki-elektroenergii-vetroelektrostantsiyami (дата обращения: 22.02.2025).
12. *Манусов В.З., Холдонов А.А., Бойко К.Н., Халдаров Ш.К.* Повышение степени интеграции ветроэнергетических станций в энергосистему путем использования у системного оператора математических моделей прогнозирования ветра и электропотребления // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – № 3 (35).
13. *Лалаян А.Г., Болбаков Р.Г., Братусь Н.В.* Имитационная модель обработки данных ветроэлектростанции на основе нейронной сети // International Journal of Open Information Technologies. – 2022. – № 5.
14. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Оценка воздействующих факторов и прогнозирование электропотребления в региональной энергосистеме с учетом режима ее эксплуатации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 2 (226). – С. 31-46.
15. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения: монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 192 с.
16. *Полуянович Н.К., Бурьков Д.В., Дубяго М.Н., Нейросетевой Н.В.* Метод прогнозирования электропотребления и его инструментальная реализация: монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2023. – 151 с.
17. *Kostjukov V.A., Maevskiy A.M., Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Adaptive mechatronic management system of wind-driven powerplant with variable geometry // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017: Conference Proceedings. – 2017. – P. 460-464.
18. *Костюков В.А., Медведев М.Ю., Маевский А.М., Полуянович Н.К., Савченко В.В.* Исследование перспективной ветроэнергетической установки с типом компоновки "Ротор в раструбе" // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 1 (88). – С. 85-91.
19. *Костюков В.А., Медведев М.Ю., Маевский А.Н., Полуянович Н.К., Савченко В.В.* Оптимизация форм геометрии раструба ветроэнергетической установки типа "Ротор в раструбе" // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 4 (91). – С. 61-68.
20. *Полуянович Н.К., Азаров Н.В., Дубяго М.Н.* Нейрокомпьютерное управление пропускной способностью кабельных сетей посредством учета и контроля их параметров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 3 (227). – С. 84-103.

REFERENCES

1. *Shepelev A.O., Artamonova E.Yu.* Klassifikatsiya sovremennykh vetroenergeticheskikh ustanovok po moshchnosti [Classification of modern wind power plants by power], *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2016, No. 17, pp. 92-96.
2. *Fazylova A.R.* Razrabotka blokov upravleniya dlya vetrogeneratorov: spetsial'nost' 47.04.01. «Filosofiya»: diss. … d-ra filos. nauk [Development of control units for wind generators: specialty 47.04.01. "Philosophy": dr. of philos. sc.] Almaty: Kazakhskiy natsional'nyy issledovatel'skiy tekhnicheskiy universitet imeni K.I. Satpaeva 2024, 121 p.
3. *Orlov D.V.* Razrabotka i issledovanie metodov prediktivnogo upravleniya moshchnost'yu vetroelektrostantsiy v elektroenergeticheskikh sistemakh: spetsial'nost' 2.4.3 «Elektroenergetika»: diss. … kand. tekhn. nauk [Development and research of methods for predictive control of wind power plants in electric power systems: specialty 2.4.3 "Electric Power Engineering": cand. of eng. sc. diss.]. Novosibirsk: Novosibirskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2023, 224 p.

4. *Özkan, Mehmet & Karagoz, Pinar*. (2019). Data Mining Based Upscaling Approach for Regional Wind Power Forecasting: Regional Statistical Hybrid Wind Power Forecast Technique (RegionalSHWIP), *IEEE Access,* pp. 1-1. 10.1109/ACCESS.2019.2956203.
5. *Gorshenin A.Yu., Denisova L.A.* Prognozirovanie vyrabotki elektroenergii vetroelektrostantsiey s primeneniem rekurrentnoy neyronnoy seti [Forecasting the electricity generation of a wind power plant using a recurrent neural network], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2023, No. 4. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-vyrabotki-elektroenergii-vetroelektrostantsiey-s-primeneniem-rekurrentnoy-neyronnoy-seti (accessed 20 February 2025).
6. *Zubova N.V.* Prognozirovanie vyrabatyvaemoy moshchnosti vetroenergeticheskoy ustanovki s pomoshch'yu nechetkikh neyronnykh setey [Forecasting the generated power of a wind turbine using fuzzy neural networks], *Problemy nauki* [Problemy nauki], 2016, No. 32 (74). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-vyrabatyvaemoy-moschnosti-vetroenergeticheskoy-ustanovki-s-pomoschyu-nechetkih-neyronnyh-setey (accessed 22 February 2025).
7. *Li Huajin.* Short-Term Wind Power Prediction via Spatial Temporal Analysis and Deep Residual Networks, *Frontiers in Energy Research,* 2022. 10. 920407. 10.3389/fenrg.2022.920407.
8. *Jamii Jannet & Mansouri Majdi & Trabelsi Mohamed & Mimouni Mohamed & Shatanawi Wasfi.* Effective artificial neural network-based wind power generation and load demand forecasting for optimum energy management, *Frontiers in Energy Research,* 2022. 10. 898413. 10.3389/fenrg.2022.898413.
9. *Liu Shu & Wang Lei & Jiang Hongliang & Liu Yan & You Hongyu*. Wind Farm Energy Storage System Based on Cat Swarm Optimization–Backpropagation Neural Network Wind Power Prediction, *Frontiers in Energy Research,* 2022. 10. 10.3389/fenrg.2022.850295.
10. *Kharlashkin D.A.* Prognozirovanie vyrabotki vetroenergeticheskikh ustanovok na osnove metodov iskusstvennogo intellekta: spetsial'nost' 1.4.4 «Prikladnaya matematika» [Forecasting the output of wind power plants based on artificial intelligence methods: specialty 1.4.4 "Applied Mathematics"]. Ekaterinburg: Ural'skiy federal'nyy universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2024, 83 p.
11. *Gorshenin A.Yu., Vasina D.I.* Sravnenie ispol'zuemykh metodov pri prognozirovanii vyrabotki elektroenergii vetroelektrostantsiyami [Comparison of the methods used in forecasting electricity generation by wind power plants], *MSiM* [MsiM], 2023, No. 3 (67). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-ispolzuemyh-metodov-pri-prognozirovanii-vyrabotki-elektroenergii-vetroelektrostantsiyami (accessed 22 February 2025).
12. *Manusov V.Z., Kholdonov A.A., Boyko K.N., Khaldarov Sh.K.* Povyshenie stepeni integratsii vetroenergeticheskikh stantsiy v energosistemu putem ispol'zovaniya u sistemnogo operatora matematicheskikh modeley prognozirovaniya vetra i elektropotrebleniya [Increasing the degree of integration of wind power stations into the energy system by using mathematical models for forecasting wind and electricity consumption by the system operator], *Problemy regional'noy energetiki* [Problems of regional energy], 2017, No. 3 (35).
13. *Lalayan A.G., Bolbakov R.G., Bratus' N.V.* Imitatsionnaya model' obrabotki dannykh vetroelektrostantsii na osnove neyronnoy seti [Simulation model for processing wind power plant data based on a neural network], International Journal of Open Information Technologies [International Journal of Open Information Technologies], 2022, No. 5.
14. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Otsenka vozdeystvuyushchikh faktorov i prognozirovanie elektropotrebleniya v regional'noy energosisteme s uchetom rezhima ee ekspluatatsii [Assessment of influencing factors and forecasting of electricity consumption in a regional power system taking into account its operating mode], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 2 (226), pp. 31-46.
15. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Sovershenstvovanie metodov diagnostiki i prognozirovaniya elektroizolyatsionnykh materialov sistem energosnabzheniya: monografiya [Improving methods for diagnostics and forecasting of electrical insulating materials for power supply systems: monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 192 p.
16. *Poluyanovich N.K., Bur'kov D.V., Dubyago M.N., Neyrosetevoy N.V.* Metod prognozirovaniya elektropotrebleniya i ego instrumental'naya realizatsiya: monografiya [Method of forecasting electricity consumption and its instrumental implementation: monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2023, 151 p.
17. *Kostjukov V.A., Maevskiy A.M., Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Adaptive mechatronic management system of wind-driven powerplant with variable geometry, *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017: Conference Proceedings,* 2017, pp. 460-464.
18. *Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Maevskiy A.M., Poluyanovich N.K., Savchenko V.V.* Issledovanie perspektivnoy vetroenergeticheskoy ustanovki s tipom komponovki "Rotor v rastrube" [Study of a promising wind power plant with a "Rotor in a socket" configuration], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Don State Technical University], 2017, Vol. 17, No. 1 (88), pp. 85-91.

19. *Kostyukov V.A., Medvedev M.YU., Maevskiy A.N., Poluyanovich N.K., Savchenko V.V.* Optimizatsiya form geometrii rastruba vetroenergeticheskoy ustanovki tipa "Rotor v rastrube" [Optimization of the geometry forms of the bell of a wind turbine of the "Rotor in a bell" type], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Don State Technical University], 2017, Vol. 17, No. 4 (91), pp. 61-68.
20. *Poluyanovich N.K., Azarov N.V., Dubyago M.N.* Neyrokomp'yuternoe upravlenie propusknoy sposobnost'yu kabel'nykh setey posredstvom ucheta i kontrolya ikh parametrov [Neurocomputer control of the bandwidth of cable networks by means of accounting and control of their parameters], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 3 (227), pp. 84-103.

Полуянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Светличный Никита Игоревич – Южный федеральный университет; e-mail: svetlichnyi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел: +79886668272; кафедра электротехники и мехатроники; бакалавр.

Качелаев Олег Вадимович – Южный федеральный университет; e-mail: 22.olezhka@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89281163960; кафедра техносферной безопасности и химии; аспирант.

Дубяго Марина Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: w_m88@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: nik1-58@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185693365; the Department of Electric Technics and Mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Svetlichnyi Nikita Igorevich – Southern Federal University; e-mail: svetlichnyi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79886668272; the Department of Electric Technics and Mechatronics; undergraduate student.

Kachelaev Oleg Vadimovich – Southern Federal University; e-mail: 22.olezhka@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281163960; the Department of Techno-Sphere Safety and Chemistry; postgraduate student.

Dubyago Marina Nikolaevna – Southern Federal University; e-mail: w_m88@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281758225; the Department of Electrical Engineering and Mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 007:51 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-144-155

Ф.А. Хуссейн, В.А. Костюков

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ

Рассматривается задача целераспределения в рамках многоагентной системы, где каждый агент представляется автономным роботом, а каждая задача соответствует позиции в двухмерной среде, которую должен посетить один из агентов. Эта задача по своей сути схожа с многоагентной версией классической задачи коммивояжёра, где вместо одного участника задействуется несколько агентов. Каждый из них должен пройти уникальный маршрут, охватывающий определённое множество городов. В связи с этим проводится исследование многоагентной задачи коммивояжёра как одного из форматов постановки задачи целерапределения. Эта задача имеет большое значение в области маршрутизации и оптимального распределения задач. Её решение включает две тесно связанные подзадачи: определение набора точек, закрепляемых за каждым агентом, и построение оптимального маршрута их посещения. В научной литературе представлены три основных подхода к решению этой задачи: подход одновременной оптимизации, при котором обе подзадачи решаются совместно; подход Cluster-First, Route-Second, где сначала распределяются города между агентами, а затем определяется порядок посещения городов каждого агента; подход Route-First, Cluster-Second, предполагающий изначальную оптимизацию порядка посещения всех городов с последующим его делением между агентами без изменения порядка посещения. В данной работе предлагается гибридный метод, сочетающий элементы подходов Cluster-First, Route-Second и Route-First, Cluster-Second. Цель – объединить сильные стороны обеих подходов и избавится от их недостатков. Для проверки эффективности разработанного метода проведено сравнительное исследование с методами, реализующие подходов Cluster-First,

Route-Second и Route-First, Cluster-Second. Оценка проводилась по трём основным метрикам: время, затраченное на построение решения, суммарная длина всех маршрутов, а также максимальная длина маршрута среди всех агентов. Результаты экспериментов показали, что применение предложенного метода позволяет сократить максимальную длину маршрута (тем самым снизив дисбаланс нагрузки между агентами) в среднем на 26%.

Многоагентная задача коммивояжера; распределение задач; целераспределение; многоагентные системы; централизованное управление; групповое управление.

F.A. Houssein, V.A. Kostyukov

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR SOLVING THE PROBLEM OF TASK ALLOCATION IN A MULTI-AGENT SYSTEM

This paper considers the problem of task distribution within a multi-agent system, where each agent is an autonomous robot, and each task corresponds to a point in a two-dimensional environment that one of the agents must visit. This problem is essentially similar to a multi-agent version of the classical traveling salesman problem, where several agents are involved instead of one participant. Each of them must go through a unique route covering a certain set of points. In this regard, a study of the multi-agent traveling salesman problem is conducted as one of the formats for setting the problem of distributing goals among agents. This problem is of great importance in the field of routing and optimal task distribution. Its solution includes two closely related subproblems: determining the set of points assigned to each agent and constructing the optimal route for visiting them. There are three main approaches to solving this problem in the scientific literature: Optimization approach, where both subproblems are solved jointly; Cluster-First, Route-Second model, where tasks are first distributed among agents, and then routes are built; The Route-First, Cluster-Second model assumes initial optimization of the route for all points with its subsequent division between agents without changing the order of visits. In this paper, a hybrid method is proposed that combines elements of the Cluster-First, Route-Second and Route-First, Cluster-Second approaches. The goal is to combine the strengths of both concepts and minimize their drawbacks. To test the effectiveness of the developed method, a comparative study was conducted. The evaluation was carried out according to three main metrics: the time spent on constructing a solution, the total length of all routes, and the maximum route length among all agents. The experimental results showed that the use of the proposed method allows for a reduction in the maximum route length (thereby reducing the load imbalance between agents) by an average of 26%.

Multi-travelling salesman problem; task distribution; goal allocation; multi-agent systems; centralized control; group control.

Введение. Многоагентные роботизированные системы представляют собой коллективы автономных роботов, способных координировать свои действия для достижения общей цели. Они используются в самых разных областях – от промышленности и логистики до сельского хозяйства, медицины и военных задач. Главная особенность таких систем – это способность каждого робота-агента действовать независимо, адаптируясь к изменяющимся условиям среды и сотрудничая с другими агентами для более эффективного выполнения задач. В связи с расширением сферы применения групп роботов, выполняющих единую миссию, возникает необходимость осуществления группового управления робототехническими комплексами (РТК) – элементами этих групп. Среди важнейших проблем, подлежащих осмыслению и решению для реализации такого управления, можно выделить проблему оптимального распределения задач и балансировки нагрузки. Распределение задач между роботами и балансировка рабочей нагрузки имеют решающее значение для оптимизации производительности и использования ресурсов. Эффективные алгоритмы распределения задач необходимы для учета таких факторов, как возможности робота, требования к задаче, приоритет, близость к задаче и текущая рабочая нагрузка. Методы балансировки нагрузки необходимы для равномерного распределения задач между роботами, избегая ситуаций, когда одни роботы перегружены, а другие недогружены.

Когда каждый агент должен выбирать актуальную для выполнения задачу из набора нескольких задач, возникает не только проблема оптимального распределения задач между агентами, но и нахождения оптимальной последовательности выполнения задач для каждого агента. Таким образом проблема множественного распределения задач сводится к многоагентной задаче коммивояжёра (МКВ) (Multiple Travelling Salesman Problem, MTSP).

Многоагентная задача коммивояжёра (МКВ) состоит из двух взаимозависимых подзадач: назначение задач (или городов) отдельным коммивояжёрам, определение оптимального порядка выполнения этих задач каждым коммивояжёром. В научной литературе выделяют три ключевых подхода к решению МКВ, различающихся стратегией разбиения и маршрутизации: Метод совместной оптимизации, Подход "Сначала кластеризация, потом построение маршрутов" (Cluster-First, Route-Second, CFRS), Подход "Сначала построение маршрута, затем разбиение" (Route-First, Cluster-Second, RFCS)

В рамках первого подхода решения многоагентной задачи коммивояжёра (МКВ) обе её составляющие – распределение задач между агентами и построение маршрутов – решаются одновременно. В соответствующих подходах используются алгоритмы или метаэвристики, которые параллельно определяют, какому агенту назначается та или иная задача и в каком порядке он будет её выполнять. Подход одновременной оптимизации охватывает широкий спектр методов, которые можно условно разделить на несколько категорий: детерминированные, метаэвристические, рыночные и др.

В [1] рассматривалась МКВ с неоднородными транспортными средствами. Авторы предложили формулировку задачи в виде задачи целочисленного линейного программирования (ILP) и разработали адаптивный алгоритм ветвей и границ. Это позволило получить приближённое решение в течение 300 секунд на примере с 100 целями и 5 агентами.

В другом исследовании [2] применялось программирование с ограничениями (CP) с использованием глобальных ограничений, интервальных переменных и алгоритмов фильтрации доменов. Однако, несмотря на теоретическую строгость, метод оказался ресурсоёмким: на задачу с 51 точкой и 3 агентами потребовалось более двух часов вычислений.

Авторы работ [3, 4] предложили решения на базе генетических алгоритмов, исследовав влияние различных операторов кроссовера: циклического (CX), частично согласованного, упорядоченного (OX), рекомбинации рёбер (ERX), с чередованием позиций (AEX) и последовательного конструктивного (SCX).

В исследовании [5] задача распределения целей между несколькими беспилотными подводными аппаратами была сведена к МКВ. Целевой функцией служила минимизация общей длины маршрутов и суммарных углов поворота, что позволяет снизить энергозатраты. Решение включало два этапа: на первом определялось количество целей для каждого аппарата, на втором применялась модифицированная система Multiple Ant Colonies System (MACS) для многокритериальной оптимизации. Экспериментальные результаты показали, что этот подход превосходит классическую систему ACO. В целом, подход одновременной оптимизации позволяет получить решения высокого качества, однако это достигается за счёт значительных вычислительных затрат.

Второй подход (CFRS) представляет собой двухэтапную стратегию. На первом этапе выполняется кластеризация, то есть задачи (города) распределяются между коммивояжёрами. На втором этапе для каждого агента решается отдельная задача коммивояжёра (КВ) – определяется оптимальный порядок посещения закреплённых за ним городов с учётом минимизации выбранного критерия качества. Таким образом, подход CFRS позволяет декомпозировать исходную МКВ на несколько более простые задачи КВ, что существенно снижает размерность пространства поиска решений [6–8]. Этот подход часто применяется для повышения эффективности эвристических алгоритмов, особенно в случае задач большого масштаба.

Одним из первых исследований, в котором было предложено использовать методы кластеризации в рамках решения МКВ, стала работа [9]. В ней авторы применили схему аттрактора соседства, комбинируя её с различными эвристиками – включая алгоритм сжатия и методы эволюционных вычислений. Эти гибридные подходы были протестированы на трёх разных задачах, и полученные результаты заложили основу нового направления в решении задач МКВ. С тех пор в ряде исследований разрабатывались комбинированные методы, объединяющие кластеризацию с одним или несколькими эвристическими алгоритмами маршрутизации.

Хотя подход CFRS позволяет значительно сократить время вычислений за счёт разбиения на подзадачи, он имеет и определённые ограничения. В частности, ему не присущ встроенный механизм оптимизации по критерию MinMax, что реализует третий подход (RFCS), основанная на следующей стратегии: сначала формируется единый маршрут,

охватывающий все города задачи – так называемый супер-маршрут. После этого маршрут делится между несколькими агентами без изменения порядка следования городов. Таким образом, исходная МКВ сводится к решению одной задачи коммивояжёра (КВ). Данный подход известен в литературе как Route-First, Cluster-Second (RFCS) [10–12]. Изначально он применялся в задачах маршрутизации транспортных средств (VRP), где дополнительно учитываются параметры вместимости и грузоподъёмности, в отличие от классической МКВ.

В работе [13] представлен интересный пример реализации этого подхода. Автор использовал алгоритм Беллмана, применимый к направленным ациклическим графам, для эффективного разбиения супер-маршрута. Суть алгоритма сводится к следующему: два вложенных цикла (с индексами i и j) последовательно проверяют все подпоследовательности вида (Ti, Ti+1, ..., Tj), вычисляя для каждой из них стоимость маршрута и совокупную нагрузку. Если загрузка превышает допустимый предел, соответствующий отрезок исключается из рассмотрения. Как и первый подход, RFCS обладает высокой потенциальной точностью, так как позволяет решать задачу оптимально. Однако это сопровождается существенными вычислительными затратами, особенно при увеличении числа городов: при n задачах пространство решений составляет (n–1)!.

Легко видеть, что подход RFCS предоставляет более гибкий механизм оптимизации по критерию MinMax, так как деление маршрута может учитывать баланс нагрузки между агентами. Тем не менее, высокая вычислительная сложность ограничивает его применимость в случае крупномасштабных задач.

Проведённый анализ показал, что подход Route-First, Cluster-Second (RFCS) с предложенной модификацией демонстрирует лучшие результаты по критерию максимальной длины маршрута, что способствует более равномерному распределению нагрузки между агентами. Однако, основным недостатком данного подхода является высокая вычислительная сложность по сравнению с подходом Cluster-First, Route-Second (CFRS). Это объясняется тем, что при использовании RFCS муравьиный алгоритм работает в пространстве решений размером (n–1)!, где n — общее количество задач. В то же время, при CFRS, где задачи предварительно распределяются между m агентами, размер пространства решений составляет приблизительно (n/m)!, что значительно сокращает вычислительные затраты. С увеличением размера пространства решений снижается вероятность нахождения оптимального решения с помощью эвристического метода (например, муравьиного алгоритма), и возрастает риск выхода за рамки локального минимума, что дополнительно увеличивает время расчёта. В связи с этим, в данной работе предлагается гибридный метод, который объединяет достоинства обеих подходов – RFCS и CFRS, чтобы одновременно:

- сохранить балансировку маршрутов между агентами;
- сократить время вычислений за счёт сокращения размерности поиска;
- минимизировать влияние локальных минимумов за счёт комбинированной структуры алгоритма.

Предложенный метод нацелен на достижение оптимального компромисса между качеством решения и его вычислительной эффективностью, что особенно важно для применения в миссиях с большим числом агентов и задач.

Метод Cluster, Route, Connect, Split. представляет собой гибридный метод, сочетающий сильные стороны двух известных подходов:

- Cluster-First, Route-Second (CFRS) – позволяет сократить пространство решений путём предварительного распределения задач;
- Route-First, Cluster-Second (RFCS) – обеспечивает эффективную балансировку нагрузки между агентами за счёт оптимизации маршрута целиком.

Алгоритм реализации предлагаемого метода состоит из четырёх ключевых этапов, указываемых ниже.

1. Кластеризация (Cluster). На этом этапе задачи (города) распределяются на кластеры. Цель – уменьшить размер пространства решений за счёт локализации маршрутов. Для кластеризации используется алгоритм K-Means [14] с числом кластеров, равным 4, что предварительно определено как разумный компромисс между качеством решения и временем вычислений.

2. Маршрутизация (Route). Для каждого полученного кластера строится внутренний маршрут с использованием муравьиного алгоритма [15] или других эвристических методов. Это позволяет предварительно оптимизировать маршруты внутри кластеров.

3. Соединение (Connect) После маршрутизации необходимо объединить кластеры в единый маршрут. Для этого в каждом кластере выбираются два узла, которые будут соединяться с соседними кластерами. Предлагаемая эвристика: для каждого кластера определяются два ближайших узла к соседним кластерам, минимизируя суммарную длину соединений.

4. Разделение (Split) Сформированный супермаршрут разбивается на подмаршруты, каждый из которых начинается и заканчивается в депо, и закрепляется за конкретным агентом (коммивояжёром). При разбиении учитываются такие факторы, как: балансировка нагрузки между агентами, ограничение на максимальную длину маршрута, равномерность распределения задач. Подробное описание алгоритма разбиения приведено в работе [16].

Таким образом, суть предложенного метода заключается в объединении структурной эффективности CFRS (снижение размерности задачи) с оптимизационной гибкостью RFCS (снижение дисбаланса маршрутов). Это позволяет достичь высокого качества решений при приемлемом времени вычислений, особенно на больших экземплярах задач МКВ.

Для реализации предлагаемого метода необходимо последовательно решить ряд вспомогательных задач, каждая из которых оказывает существенное влияние на качество и эффективность итогового маршрута. В частности, требуется определить параметры и механизмы, обеспечивающие корректную работу всех этапов алгоритма. На первом этапе требуется ответить на следующие ключевые вопросы**.**

1. Сколько кластеров следует формировать при кластеризации городов?

Выбор количества кластеров напрямую влияет на размер подзадач маршрутизации определение оптимального числа кластеров необходимо для достижения компромисса между качеством решения и временем его вычисления.

Для анализа взаимосвязи между временем расчета и качеством решения (в терминах суммарной длины маршрута и максимальной длины маршрута среди агентов – MinMax) в зависимости от количества кластеров и числа агентов были использованы три классические задачи из библиотеки TSPLIB: eil51, kroA100 и kroA150, содержащие 51, 100 и 150 городов соответственно. Для каждой из этих задач были рассмотрены три сценария с различным количеством коммивояжёров: 3, 5 и 10 агентов. В каждом сценарии проводились вычисления при количестве кластеров от 2 до 10. Для получения статистически значимых результатов каждый случай запускался по 100 раз, после чего усреднялись значения целевых метрик. На основании полученных данных можно заключить, что разделение на 4 кластера является хорошим приближением к оптимальному компромиссу между качеством решения и вычислительными затратами, что делает этот параметр предпочтительным для применения в предлагаемом методе.

2. Каким образом следует соединять кластеры между собой для формирования супермаршрута?

Необходимо определить стратегию выбора узлов на границе кластеров, которые будут использоваться для их соединения. Эти узлы должны минимизировать стоимость объединения маршрутов и обеспечивать логичное построение супермаршрута.

Для определения этих узлов предлагается исследовать следующую эвристику: определить ближайшие друг к другу 2 узла соседних кластеров. Здесь возникает вопрос как определить соседние кластеры, с которыми данный кластер будет напрямую связываться, так как определение таких кластеров как кластеры, имеющие ближайшие 2 узла, может привести к плохому решению, рис. 1 демонстрирует такую ситуацию. Алгоритм соединения на основе двух ближайших городов разных кластеров сначала соединяет города $г_3$ из кластера 1 и $г_9$ из кластера 3, так как они самые близкие к друг другу, затем соединяет $г_2$ и $г_4$, $г_8$ и $г_{11}$, после чего остается соединить кластеры 2 и 4 между собой чтобы получить цикл Гамильтона, а ближайшие друг к другу города в этих кластерах являются г5 и г10, в итоге маршрут пересекается с самим собой.

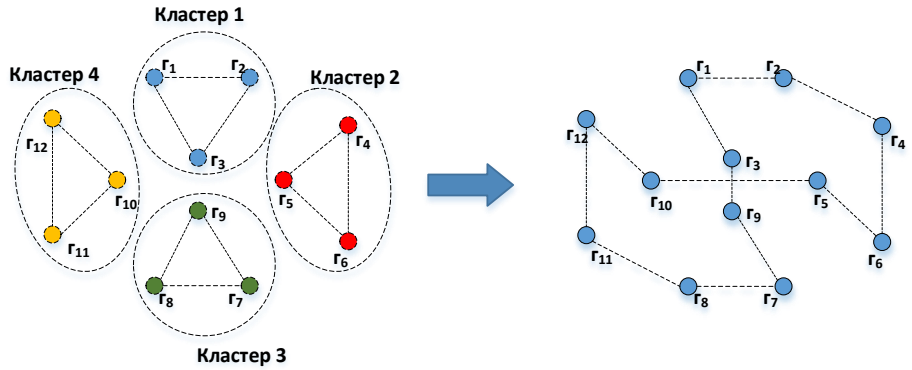


Рис. 1. Пример пересечения маршрута с самим собой

Для решения этой проблемы предлагается сначала найти оптимальный межкластерный цикл Гамильтона (цикл Гамильтона, обходящий центра кластеров) и соединять кластеры только с соседними кластерами по этому циклу. Таким образом, соединяем ближайшие города кластеров 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 4 и 1, избежав соединения кластеров 1 и 3, как показано на рис. 2.

3. Как следует учитывать будущие межкластерные соединения при построении маршрутов внутри кластеров?

Так как маршруты внутри кластеров в дальнейшем будут частью единого супермаршрута, необходимо учитывать возможность их «стыковки» между кластерами уже на этапе маршрутизации. Это требует специального подхода при решении задачи КВ в каждом кластере.

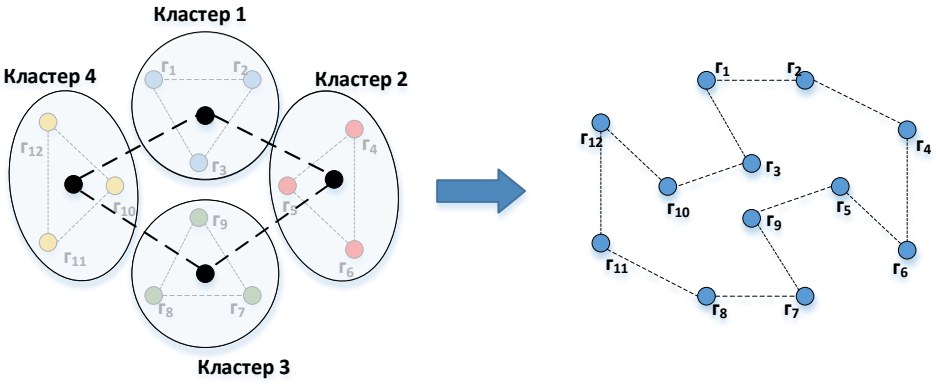


Рис. 2. Пример предложенного решения проблемы пересечения маршрута с самим собой

Например, в подходе CFRS чтобы решить проблему много-агентного коммивояжёра стоит лишь искусственно добавить города депо в каждом кластере, затем найти оптимальный цикл Гамильтона в каждом кластере, однако, в предлагаемом методе такое решение не подходит в связи с тем, что эти под-маршруты нужно заново соединить друг с другом через узлы соединения, что приводит к существенному (далеко от оптимальному) изменению порядка посещения городов внутри каждого кластера. Рис. 3 демонстрирует ситуацию, где после расчета оптимального цикла Гамильтона в каждом кластере происходит соединение соседних кластеров по принципу ближайших узлов (кластеры 1 и 2 через узлы $г_5$ и $г_7$, кластеры 2 и 3 через узлы $г_{10}$ и $г_{13}$, кластеры 3 и 4 через узлы $г_{16}$ и $г_{17}$, кластеры 4 и 1 через узлы $г_{24}$ и $г_4$). Замечаем, что узлы $г_6$, $г_{11}$, $г_{12}$ и $г_{20}$ выпадают из цикла, что требует проведения дополнительных расчетов для включения их в цикле.

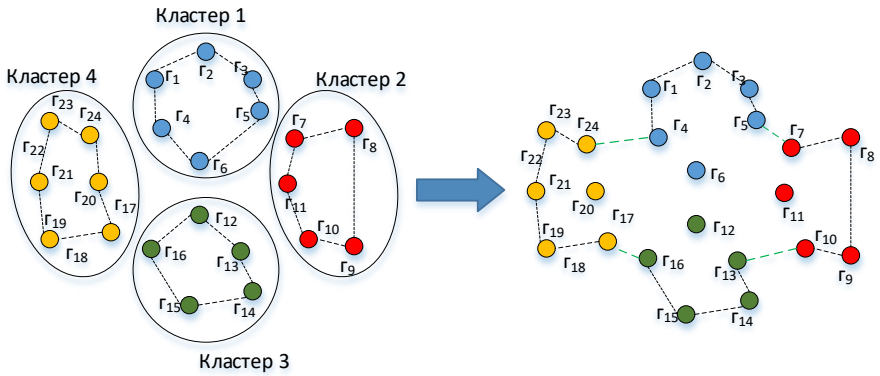


Рис. 3. Пример возникновения проблемы при соединении маршрутов

Для решения этой проблемы предлагается введение этапа определения узлов соединения перед этапом меж-кластерной маршрутизации и вместо оптимального цикла Гамильтона в каждом кластере найти оптимальный путь Гамильтона (незамкнутый путь, проходящий через все вершины графа) где начальный узел – узел соединения с предыдущим кластером, а конечный узел – узел соединения со следующим кластером. Тогда на этапе соединения кластеров проблема разрыва пути не возникает.

Таким образом, алгоритм предлагаемого метода будет выглядеть так:

Алгоритм 1 предлагаемый метод.

1 Инициализация гиперпараметров муравьиного алгоритма и количества кластеров
2 Кластеризация с помощью алгоритма K-Means
3 Поиск оптимального меж-кластерного цикла Гамильтона
4 Определение узлов соединения кластеров
5 Поиск оптимального Гамильтонова пути в каждом кластере
6 Соединение Гамильтоновых путей в супер-маршрут с помощью узлов соединения
7 Разделение супер-маршрута между агентами на под-маршруты

Моделирование и Результаты. Для оценки эффективности предлагаемого метода и проведения сравнительного анализа его производительности с существующими методами из подходов Cluster-First, Route-Second и Route-First, Cluster-Second использованы три задачи из библиотеки эталонных задач коммивояжёра TSPLIB [17]: eil51, kroA100 и kroA150, содержащие соответственно 51, 100 и 150 городов. Для каждой задачи рассматривались три сценария с различным количеством коммивояжёров: 3, 5 и 10 агентов. Чтобы обеспечить достоверность результатов, каждый сценарий запускался по 100 раз, и результаты усреднялись для получения представительной выборки. Для сравнения были реализованы два эталонных метода:

1. Из подхода Cluster-First, Route-Second: в качестве реализации этого подхода была выбрана работа Латаха [18], в которой предложен алгоритм KM-CACO. На первом этапе используется алгоритм K-Means для кластеризации городов, где число кластеров соответствует числу агентов. Далее внутри каждого кластера строится оптимальный маршрут с помощью модифицированного муравьиного алгоритма (ACO).
2. Из подхода Route-First, Cluster-Second: в качестве реализации этого подхода использован метод из работы [19], где предлагается построить единый маршрут на все города с использованием муравьиного алгоритма, а затем разбить его между агентами так, чтобы минимизировать дисбаланс нагрузки между ними (в терминах длины маршрута).

Критерии оценки производительности указанных методов:

- времени расчета решения многоагентной задачи коммивояжёра.
- суммы пройденных коммивояжёрами путей, согласно следующей формуле:

$$\min_{Tour_i \in TOURS}\left(\sum_{i=1}^{m} C(Tour_i)\right), \quad (1)$$

при условии: $Tour_i \cap Tour_j = \emptyset, \forall\, i \neq j, i \leq 1, j \leq m$,

где i, j – номер коммивояжера, $Tour_i$ – маршрут i-го коммивояжера, m – количество коммивояжеров задачи, *TOURS* – совокупность всех возможных туров. *C(.)* – функционал качества (длина маршрута).

- максимального по длине пути среди путей, пройденных коммивояжёрами, для сравнения сбалансированности и равномерности распределения городов между коммивояжёрами, согласно формуле:

$$\min_{Tour_i \in TOURS}\left(\max_{j \in 1 \ldots m} C(Tour_j)\right), \quad (2)$$

при условии: $Tour_i \cap Tour_j = \emptyset, \forall\, i \neq j, i \leq 1, j \leq m$.

Коэффициент испарения феромона муравьиного алгоритма во всех сценариях составил 0.5; количество муравьев K составило n, Критерием завершения работы муравьиного алгоритма было повторение 20 итераций без повышения качества найденного решения. Такой выбор гиперпараметров муравьиного алгоритма предложен в [20] как оптимальный для решения задачи коммивояжёра.

Алгоритмы запрограммированы на языке Python 3.8. Для моделирования использовался процессор Intel Core i7-9700KF CPU @ 3.60GHz RAM= 32GB, ОС Windows 10 Pro 64-bit.

Табл. 1, 2 и 3 содержат результаты решения соответствующих задач eil51, kroA100 и kroA150, с количествами коммивояжёров 3, 5 и 10, соответственно; здесь приведены проценты ситуаций (% Выигрыша), в которых предлагаемый метод показал результат лучший, чем методов реализующих подходов CFRS и RFCS с точки зрения суммы пройденных путей и критерия минимальности максимальной длины пути; Также выражены преимущества в процентах при использовании предлагаемого метода в отношении времени расчета, суммарной и максимальной длин пути. При этом отрицательный процент означает, что предлагаемый метод в таких ситуациях не уменьшает показатель качества решения (времени расчета, суммарной и максимальной длин пути), а увеличивает его по сравнению с остальными методами.

Преимущество предлагаемого метода m_p в отношении рассмотренных здесь других методов m_2 в процентах по каждому из **трех** критериев оценки Ψ_x (по среднему времени вычисления среди 100 запусков по времени расчета решения в секундах (μ_t), по сумме длин путей в метрах (μ_{sum}) и по максимальной длине пути среди коммивояжёров в метрах (μ_{max})), можно рассчитать следующим образом:

$$\Delta_{\Psi_x} = \left(1 - \frac{\Psi_x^{(m_p)}}{\Psi_x^{(m_2)}}\right).100\,. \quad (3)$$

Таблица 1

Выигрыш при использовании предлагаемого метода для задачи eil51

Подход	CFRS			RFCS		
m	3	5	10	3	5	10
% Выигрыша	64	93.75	96.7	8.9	91	95.4
Avg Δ_{μ_t}	63.25	67.86	-233.26	95.18	93.93	45.86
Avg $\Delta_{\mu_{sum}}$	-5.85	-5.32	-7.5	-6.09	0.75	0.02
Avg $\Delta_{\mu_{max}}$	3.03	4.63	5.73	-5.95	0	-0.74

Таблица 2

Выигрыш при использовании предлагаемого метода для задачи KroA100

Подход	CFRS			RFCS		
m	3	5	10	3	5	10
% Выигрыша	100	97.8	97.75	68	94.6	97.75
Avg Δ_{μ_t}	47.48	60.33	-168.42	95.67	94.77	59.9
Avg $\Delta_{\mu_{sum}}$	-2.05	-5.59	-9.97	-4.29	0.23	-1.15
Avg $\Delta_{\mu_{max}}$	12.07	8.20	4.29	-4.13	1.28	-0.06

Таблица 3

Выигрыш при использовании предлагаемого метода для задачи KroA150

Подход	CFRS			RFCS		
m	3	5	10	3	5	10
% Выигрыша	99.6	98.6	98.3	79.6	92	97.7
Avg Δ_{μ_t}	34.12	52.54	-132.95	95.95	95.30	68.09
Avg $\Delta_{\mu_{sum}}$	0.47	-4.56	-9.20	-3.41	0.17	-0.54
Avg $\Delta_{\mu_{max}}$	16.53	9.21	5.25	-3.6	0.96	0.2

На рис. 4 показаны скрипочные диаграммы выигрыша в процентах по времени расчета, суммы длин путей и максимальной длины путей при использовании предлагаемого метода для каждой эталонной задачи.

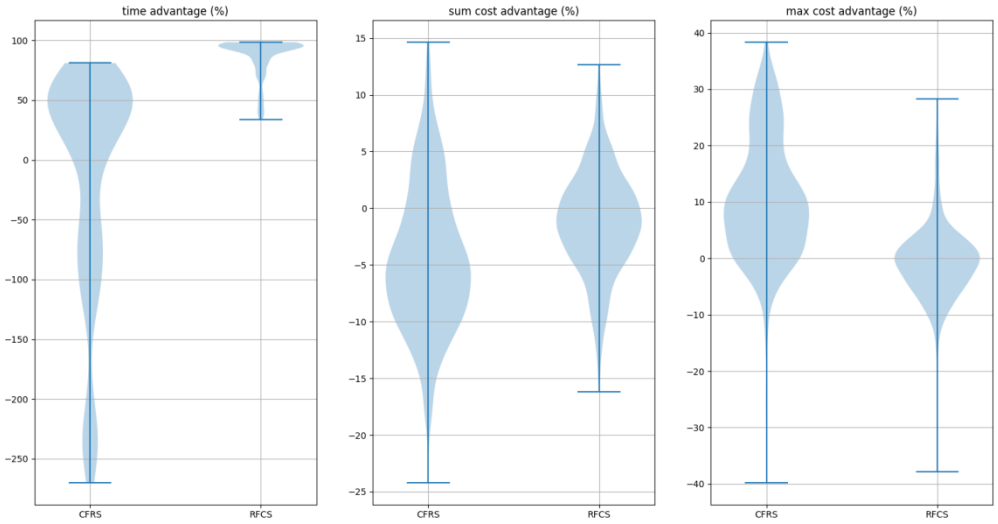


Рис. 4. Скрипичные диаграммы выигрыша при использования предлагаемого метода

На основании представленных в этих таблицах данных можно сделать вывод, что предлагаемый метод имеет преимущество по времени расчета для 3 и 5 агентов, и по критерии MinMax – для 5 и 10 агентов.

Анализ полученных результатов расчета, представленных в указанных таблицах, показывает, что предложенный метод по сравнению с RFCS уменьшает время расчета на 88–2860%, а максимальная длина пути среди коммивояжёров уменьшается в среднем на 0.1–10 % для задач с 5 и 10 агентами и увеличивает в среднем на 2–5 % для задач с 3 агентами.

Предложенный метод по сравнению с CFRS уменьшает время расчета на 12–68% для задач с 3 и 5 агентами и увеличивает в среднем на 60–233 % для задач с 10 агентами, а максимальная длина пути среди коммивояжёров уменьшается в среднем на 1–26 %.

Заключение. Предлагается гибридный метод решения многоагентной задачи коммивояжера на основе уменьшения пространства решений. Проведено исследование предложенной методики на трех эталонных задачах коммивояжера с участием 3, 5, 10 агентов. Качество решения измерялось по 3 критериям: времени расчета решения, сумме расстояний маршрутов всех коммивояжеров, максимальной длине пути среди пройдённых всеми агентами маршрутов. Результаты сравнялись с традиционными методами решения МКВ на основе муравьиного алгоритма. Статистический анализ результатов показал, что в среднем, предложенный метод предлагает хороший компромисс между временем расчета и качеством решения.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00492 «**Разработка методов оптимального целераспределения в группе подвижных робототехнических комплексов**», https://rscf.ru/project/24-29-00492/ на базе АО «НКБ Робототехники и систем управления».*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Sundar K., Rathinam S.* Algorithms for heterogeneous, multiple depot, multiple unmanned vehicle path planning problems // J. Intell. Robot. Syst., Theory Appl. – 2017. – 88 (2–4). – P. 513-526. – http://dx.doi.org/10.1007/s10846- 016-0458-5.
2. *Vali M., Salimifard K.* A constraint programming approach for solving multiple traveling salesman problem // The Sixteenth International Workshop on Constraint Modelling and Reformulation. – 2017.
3. *Shuai Y., Bradley S., Shoudong H., Dikai L.* A new crossover approach for solving the multiple travelling salesmen problem using genetic algorithms // European J. Oper. Res. – 2013. – P. 72-82.
4. *Al-Omeer M.A., Ahmed Z.H.* Comparative study of crossover operators for the mtsp // 2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS). – IEEE, 2019. – P. 1-6.
5. *Xu Z., Li Y., Feng X*. Constrained multi-objective task assignment for UUVS using multiple ant colonies system // 2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. – 2008. – Vol. 1. – P. 462-466. – http://dx.doi.org/10.1109/CCCM.2008.318.
6. *Shabanpour M., Yadollahi M., Hasani M.M.* A New Method to Solve the Multi Traveling Salesman Problem with the Combination of Genetic Algorithm and Clustering Technique // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. – May 2017. – Vol. 17, No. 5.
7. *Basma H., Bashir H., Cheaitou A.* A Novel Clustering Method for Breaking Down the Symmetric Multiple Traveling Salesman Problem // Journal of Industrial Engineering and Management JIEM. – 2021. – Vol. 14, No. 2.
8. *Arthur D., Vassilvitskii S.* K-Means++: The Advantages of careful seeding // Proceedings of the 8th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms. – 2007.
9. *Sofge D., Schultz A., & De Jong K.* Evolutionary computational approaches to solving the multiple traveling salesman problem using a neighborhood attractor schema // Proceedings of the Applications of Evolutionary Computing on EvoWorkshops. – 2002. – P. 153-162.
10. *Beasley J.E.* Route First - Cluster Second Methods for Vehicle Routing // Omega. – 1983. – Vol. 11, Issue 4. – P. 403-408.
11. *Bozdemir M.K., Bozdemir M., Burcu Ö.* Route First - Cluster Second Method for Personal Service Routing Problem // Journal of Engineering Studies and Research. – 2019. – Vol. 25. No. 2. – P. 18-24.
12. *Houssein F.A., Kostyukov V.F. and Evdokimov I.D*. A method for solving the multi-traveling salesman problem based on reducing the size of the solution space // 2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Vallette, Malta, 2024. – P. 1729-1733. – DOI: 10.1109/CoDIT62066.2024.10708116.
13. *Prins C*. A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem // Comput. Oper. Res. – 2004. – 31. – P. 1985-2002.
14. *Morissette, Laurence & Chartier, Sylvain*. The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica // Tutorials in Quantitative Methods for Psychology. – 2013. – 9. – P. 15-24. – 10.20982/tqmp.09.1.p015.
15. *Dorigo M., Birattari M., Stutzle T.* Ant colony optimization // IEEE Comput. Intell. Mag. – 2006. – P. 28-39.
16. *Хуссейн Ф.А.* Разработка и исследование метода централизованного распределения задач в мультиагентных системах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – №. 4.
17. *Ruprecht-Karls.* TSPLIB. Available online: http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95 (accessed on 4 August 2024).
18. *Latah M*. Solving multiple TSP problem by K-means and crossover based modified ACO algorithm // International Journal of Engineering Research and Technology. – 2016. – Vol. 5, No. 02.

19. *Костюков В.А., Хуссейн Ф.А., Евдокимов И.Д.* Метод решения проблемы мульти-коммивояжёра в среде без препятствий на основе уменьшения размера пространства решений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. No. 1.
20. *Dorigo M., Maniezzo V., & Colorni A.* Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B. – 1996. – 26 (1). – P. 29-41.

REFERENCES

1. *Sundar K., Rathinam S.* Algorithms for heterogeneous, multiple depot, multiple unmanned vehicle path planning problems, *J. Intell. Robot. Syst., Theory Appl*., 2017, 88 (2–4), pp. 513-526. Available at: http://dx.doi.org/10.1007/s10846- 016-0458-5.
2. *Vali M., Salimifard K.* A constraint programming approach for solving multiple traveling salesman problem, *The Sixteenth International Workshop on Constraint Modelling and Reformulation,* 2017.
3. *Shuai Y., Bradley S., Shoudong H., Dikai L.* A new crossover approach for solving the multiple travelling salesmen problem using genetic algorithms, *European J. Oper. Res*., 2013, pp. 72-82.
4. *Al-Omeer M.A., Ahmed Z.H.* Comparative study of crossover operators for the mtsp, *2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS)*. IEEE, 2019, pp. 1-6.
5. *Xu Z., Li Y., Feng X*. Constrained multi-objective task assignment for UUVS using multiple ant colonies system, *2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management,* 2008, Vol. 1, pp. 462-466. Available at: http://dx.doi.org/10.1109/CCCM.2008.318.
6. *Shabanpour M., Yadollahi M., Hasani M.M.* A New Method to Solve the Multi Traveling Salesman Problem with the Combination of Genetic Algorithm and Clustering Technique, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security,* May 2017, Vol. 17, No. 5.
7. *Basma H., Bashir H., Cheaitou A.* A Novel Clustering Method for Breaking Down the Symmetric Multiple Traveling Salesman Problem, *Journal of Industrial Engineering and Management JIEM,* 2021, Vol. 14, No. 2.
8. *Arthur D., Vassilvitskii S.* K-Means++: The Advantages of careful seeding, *Proceedings of the 8th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms,* 2007.
9. *Sofge D., Schultz A., & De Jong K.* Evolutionary computational approaches to solving the multiple traveling salesman problem using a neighborhood attractor schema, *Proceedings of the Applications of Evolutionary Computing on EvoWorkshops,* 2002, pp. 153-162.
10. *Beasley J.E.* Route First - Cluster Second Methods for Vehicle Routing, *Omega,* 1983, Vol. 11, Issue 4, pp. 403-408.
11. *Bozdemir M.K., Bozdemir M., Burcu Ö.* Route First - Cluster Second Method for Personal Service Routing Problem, *Journal of Engineering Studies and Research,* 2019, Vol. 25. No. 2, pp. 18-24.
12. *Houssein F.A., Kostyukov V.F. and Evdokimov I.D*. A method for solving the multi-traveling salesman problem based on reducing the size of the solution space, *2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Vallette, Malta, 2024,* pp. 1729-1733. DOI: 10.1109/CoDIT62066.2024.10708116.
13. *Prins C*. A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem // Comput. Oper. Res. – 2004. – 31. – P. 1985-2002.
14. *Morissette, Laurence & Chartier, Sylvain*. The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica, *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology,* 2013, 9, pp. 15-24. 10.20982/tqmp.09.1.p015.
15. *Dorigo M., Birattari M., Stutzle T.* Ant colony optimization, *IEEE Comput. Intell. Mag*., 2006, pp. 28-39.
16. *Khusseyn F.A.* Razrabotka i issledovanie metoda tsentralizovannogo raspredeleniya zadach v mul'tiagentnykh sistemakh [Development and research of the method of centralized distribution of tasks in multi-agent systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 4.
17. *Ruprecht-Karls.* TSPLIB. Available online: http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95 (accessed on 4 August 2024).
18. *Latah M*. Solving multiple TSP problem by K-means and crossover based modified ACO algorithm, *International Journal of Engineering Research and Technology,* 2016, Vol. 5, No. 02.
19. *Kostyukov V.A., Khusseyn F.A., Evdokimov I.D.* Metod resheniya problemy mul'tikommivoyazhera v srede bez prepyatstviy na osnove umen'sheniya razmera prostranstva resheniy [Method for solving the multi-traveling salesman problem in an obstacle-free environment based on reducing the size of the solution space], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 1.
20. *Dorigo M., Maniezzo V., & Colorni A.* Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B,* 1996, 26 (1), pp. 29-41.

Костюков Владимир Александрович – АО «НКБ Робототехники и систем управления»; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; научный руководитель.

Хуссейн Фирас Айманович – АО «НКБ Робототехники и систем управления»; e-mail: firas94mecha@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89996379357; м.н.с.

Kostyukov Vladimir Aleksandrovich – Joint-Stock Company "Robotics and Control Systems" e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; can. of eng. sc.; senior researcher.

Houssein Firas Aimanovich – Joint-Stock Company "Robotics and Control Systems" e-mail: firas94mecha@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79996379357; junior researcher.

УДК 004.738.5:004.023:303.222 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-155-162

А.Ю. Таранов

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕМПОРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИНТЕРНЕТ-ДИСКУССИЙ НА ОСНОВЕ КОЛИЧЕСТВА И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Целью исследования является разработка и проверка методов оценки темпоральной структуры интернет-дискуссий, основанных на анализе количества и продолжительности взаимодействий пользователей в интернете (в социальных сетях, на форумах и т.п.). Описываются разработанные в рамках данной работы новые методы оценки темпоральной структуры интернет-дискуссий, основанные на анализе количества и продолжительности взаимодействий пользователей в интернете. Особое внимание уделяется методам определения интенсивности и длительности дискуссий, что позволяет получить более точную оценку динамики обсуждений в реальном времени. Оценка интенсивности дискуссии производится через соотношение количества взаимодействий (таких, например, как комментарии, реплаи, лайки) и продолжительности онлайнового обсуждения. Предложен метод корректного определения длительности дискуссии, в котором производится учет не только время с момента публикации поста, но также и активность пользователей в процессе обсуждения, что делает данный метод более гибким и точным. Для проверки разработанных методов использовались реальные данные из сообществ ВКонтакте городов Таганрога и Сарова. Результаты практических исследований подтвердили существование ожидаемых закономерностей, таких, например, как суточные колебания в уровнях активности пользователей и всплески активности, связанные с различными важными общественными и политическими событиями. Разработанные методы оценки темпоральной структуры интернет-дискуссий на основе количества и продолжительности взаимодействий пользователей позволяют эффективно анализировать динамику вовлеченности участников дискуссий, выявлять ключевые моменты, а также значимые события в процессе онлайн-общения. Данные методы могут быть полезными в различных областях, таких как социальные исследования, маркетинг, политический анализ, управление репутационными рисками и другие, где требуется анализ активности и вовлеченности в интернете.

Социальные сети; анализ активности; интенсивность дискуссии; длительность дискуссии; временные ряды.

A.Yu. Taranov

METHODS FOR ASSESSING THE TEMPORAL STRUCTURE OF INTERNET DISCUSSIONS BASED ON THE NUMBER AND DURATION OF USER INTERACTIONS

The aim of the research is to develop and test methods for assessing the temporal structure of online discussions based on the analysis of the number and duration of user interactions on the internet (in social networks, forums, etc.). The article describes new methods for assessing the temporal structure of online discussions, developed within the scope of this work, based on the analysis of the number and duration of user interactions on the internet. Particular attention is given to methods for determining both the intensity and duration of discussions, which enables a more accurate assessment of the real-time dynamics of discussions. The intensity of a discussion is assessed through the ratio of the number of interactions (such

as comments, replies, likes) and the duration of an online discussion. Methods for accurately determining the duration of a discussion are proposed, which take into account not only the time since a post was published but also the activity of users during the discussion, making these methods more flexible and precise. The methods were tested using real data from VKontakte communities in the cities of Taganrog and Sarov. The results of the practical study confirmed the existence of expected patterns, such as daily fluctuations in user activity levels and bursts of activity associated with significant social and political events. The developed methods for assessing the temporal structure of online discussions based on the number and duration of user interactions allow for effective analysis of the dynamics of discussion participants' involvement, identifying key moments and significant events in the process of online communication. These methods can be useful in various fields, such as social research, marketing, political analysis, reputation risk management, and others, where the analysis of online activity and involvement is required.

Social networks; activity analysis; discussion intensity; discussion duration; time series.

Введение. Детектирование реакций в поведении сетевых сообществ на основании анализа их активности позволяет выявлять некоторые закономерности взаимодействий пользователей.

Одним из важнейших аспектов этой активности является дискуссионная составляющая, характеризующая степень вовлеченности участников в процесс обсуждения [1, 2]. В этом контексте особую значимость приобретает определение интенсивности дискуссий, поскольку оно позволяет количественно оценить динамику обсуждений и выявить наиболее значимые события, оказывающие влияние на рассматриваемое сообщество. Практическое применение такого анализа охватывает широкий спектр задач.

Показательным примером могут служить различные социальные исследования, в частности, анализ общественного мнения [3]. В данных областях важны способность определения актуальности темы (если интенсивность обсуждения высокая, значит, тема вызывает определенный интерес), отслеживание динамики общественных настроений (позволяет выявлять всплески обсуждений, связанные с какими-либо событиями), идентификация т. н. «информационных вбросов» [4] (резкий рост интенсивности может указывать на манипуляции или «фейковые» новости [5]).

Помимо указанных областей, возможность определения интенсивности дискуссий может играть важную роль и в других сферах: в анализе эффективности маркетинга и популярности брендов [6, 7], управлении онлайн-сообществами [8, 9], кибербезопасности [10], политических и экономических исследованиях [11, 12], контроле репутационных рисков [13, 14] и прочих.

Общая проблематика. Для определения интенсивности интернет-дискуссий в настоящее время применяют различные методики, среди которых исследования дискурсов, как потоков, образующих древовидные структуры [15], использование вычислительно сложных методов изучения социальных сетей с применением корреляционного и регрессионного анализа [16] и др. При этом ряд исследователей вообще избегают использования общей интенсивности в силу различных причин, применяя иные, более значимые или полезные с их точки зрения, метрики для определения характеристик дискуссий [17–19], либо же производя оценку не общей интенсивности дискурса, а каких-то его более узких аспектов [20].

Однако, несмотря на разнообразие методик, вопрос о том, как измерять интенсивность дискуссий наиболее эффективно, остается открытым. Имеющиеся способы:

- или не позволяют выразить ее количественно,
- или недостаточно точны и однозначны,
- или требуют существенных затрат времени и ресурсов.

Все это затрудняет анализ динамики онлайн-дискурса с течением времени и проведение сравнений интенсивностей, полученных в различные моменты.

Самым простым и очевидным способом определения интенсивности дискуссии является определение соотношения таких ее характеристик, как число взаимодействий пользователей в рамках дискуссии и ее длительность.

Под взаимодействием будем подразумевать акт активности пользователя, направленный на демонстрацию своего участия в дискуссии. Как правило, это выражение своего мнения по поводу объекта обсуждения в виде комментариев, реплаев (*reply*, ответ на

чей-то предшествующий комментарий), лайков или дизлайков (*like/dislike*, невербальная форма демонстрации своего положительного или отрицательного отношения к высказываниям других пользователей) [21].

Длительность дискуссии является несколько более сложным для определения параметром. Несомненно, можно определять ее как временной интервал от начала дискуссии до хронологически последнего проявления активности пользователей, однако данный подход имеет существенный изъян.

Если у нас имеется 2 абсолютно одинаковые дискуссии, то их интенсивность, очевидно, тоже окажется одинаковой. Представим, что дискуссии просуществовали в состоянии активности неделю, но со временем исчерпали себя и затухли. Предположим, что спустя год в одной из них кто-то из пользователей оставляет комментарий. В такой ситуации, та дискуссия, в которой произошел минимальный всплеск активности, получит существенное снижение количественной оценки интенсивности – рост числа проявлений активности минимален (всего один дополнительный комментарий), а рост продолжительности дискуссии очень значителен (длительность дискуссии увеличивается в 53 раза – с одной недели до пятидесяти трех).

Представленный пример показывает некорректность данного подхода, как минимум в части случаев, с точки зрения ожиданий от поведения рассматриваемого параметра: появление дополнительной активности в дискуссии должно увеличивать ее интенсивность или, как минимум, не снижать.

Метод оценки интенсивности дискуссии. Под интенсивностью дискуссии понимается соотношение числа взаимодействий пользователей и длительности дискуссии. Но, как было указано ранее, существует вопрос о том, каким образом определять эту длительность (главным образом, как определять момент окончания дискуссии). Если принять за момент окончания дискуссии, например, момент написания последнего комментария, то график интенсивности дискуссии будет иметь нелинейный вид – с течением времени интенсивность снижается, устремляясь к нулю, как показано на рис. 1. При этом, может возникнуть ситуация, когда по прошествии определенного времени дискуссия разгорается вновь, как показано на рис. 2.

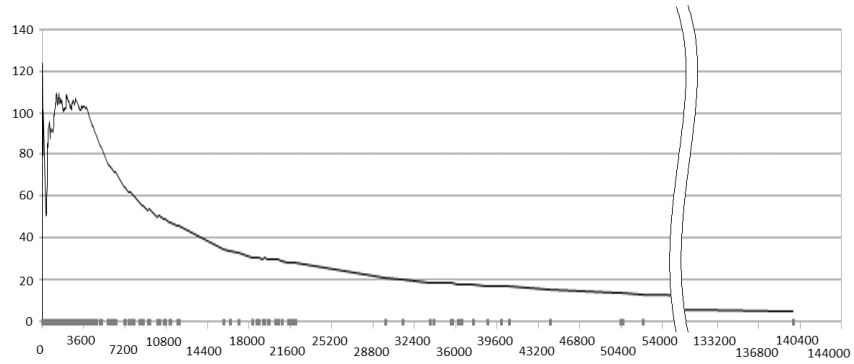


Рис. 1. График интенсивности дискуссии (пример). По горизонтальной оси – время в секундах, по вертикальной – интенсивность дискуссии (число взаимодействий в час). Черная линия – график уровня интенсивности, точки на горизонтальной оси – взаимодействия (комментарии, реплаи, лайки)

Как видно из приведенных графиков, большой интервал, в течение которого дискуссия затихает, существенно влияет на значение интенсивности. Так, на рис. 1 видно, что к моменту времени t≈50400-54000 секунд (14-15 часов) от начального сообщения значение интенсивности составляет примерно 13,1 взаимодействия в час. Однако к моменту времени t≈140400 секунд (39 часов) средняя интенсивность, из-за появления во временной последовательности всего одного комментария, снижается в разы, до значения 4,9 взаимодействия в час. Это существенно меняет характер дискуссии с точки зрения количественного анализа, что может привести к некорректным выводам, например, при сравнении двух дискуссий.

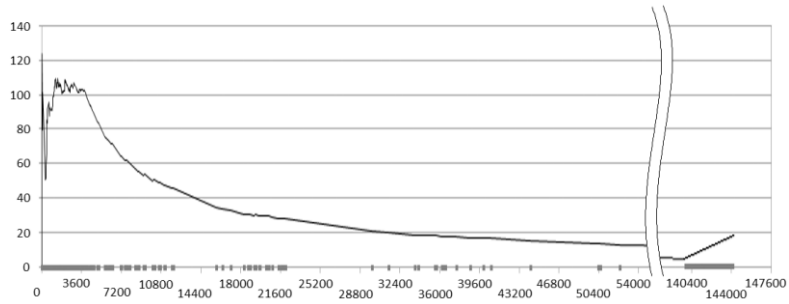


Рис. 2. График интенсивности дискуссии с добавлением синтетических данных, имитирующих возобновление дискуссии (справа)

Соответственно, необходимо изменить метод оценки дискуссии. Для этого предлагается рассматривать не интенсивность дискуссии, а сумму ее значений, вычисленных в моменты, когда происходят интересующие нас события (взаимодействия). Это позволяет получить неубывающую функцию, анализировать поведение которой проще.

Назовем указанный параметр суммарной интенсивностью, рассчитываемой по следующей формуле:

$$I_i = \sum (I_{event\ j} \mid S_j > T_{min}) \ \ (j \in [1;N]),$$

$$S_j = (I_j - I_{j-1}) / (t_j - t_{j-1}),$$

где I_i – суммарная интенсивность в момент времени i, S_j – средний темп изменения суммарной интенсивности в момент времени j, $I_{event\ j}$ – интенсивность (соотношение числа взаимодействий к длине временного интервала, прошедшего от начального сообщения до данного взаимодействия) в момент времени взаимодействия j, такая, что скорость возрастания функции S_j в этот момент достаточна для определения момента как момента активности (при числе взаимодействий, равном N).

График изменения суммарной интенсивности дискуссии со временем представлен на рис. 3.

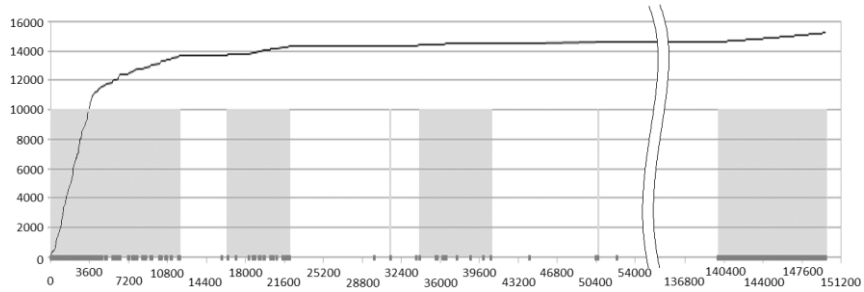


Рис. 3. График изменения суммарной интенсивности дискуссии. По горизонтальной оси – время в секундах, по вертикальной – значение суммарной интенсивности. Серым выделены временные интервалы, определенные как «активная фаза дискуссии»

Применение суммарной интенсивности, помимо всего прочего, позволяет достаточно просто определять периоды, когда дискуссия затихает или, наоборот, разгорается с новой силой. Для этого достаточно анализировать скорость возрастания функции, описывающую суммарную интенсивность, т.е., фактически, определять характер касательной к графику (тангенс угла наклона касательной в интересующий момент времени).

Метод оценки длительности дискуссии. Итак, как уже было указано, интенсивность зависит от количества и продолжительности взаимодействий между пользователями в ходе дискуссии. И если с количеством взаимодействий все предельно просто, то с определением продолжительности возникает вопрос, который заключается в том, в каком интервале считать длительность дискуссии.

С началом дискуссии все более или менее понятно – ее началом можно считать момент времени, когда произошла публикация начального сообщения.

В принципе, для повышения качества анализа параметров дискуссии, можно предусмотреть временной интервал, сдвигающий момент, который стоит считать началом дискуссии, вправо от момента начальной публикации. Он станет неким фильтром, позволяющим отсечь часть сообщений, которые могут потенциально отправлять боты, имеющие почти мгновенную реакцию, или сообщения, представляющие собой т.н. «истеричную реакцию» (например, когда фанаты какой-либо знаменитости пишут одобрительные комментарии своему кумиру, даже не вдаваясь в то, что он, собственно, опубликовал). Данный интервал можно принять равным, например, одной минуте от момента опубликования поста.

Более интеллектуальным и гибким подходом может стать динамическое определение этого интервала-фильтра исходя из длины поста – чем длиннее пост, тем больше интервал (т.е. учитывается длительность дискуссии только с учетом тех комментариев, лайков или реплаев, которые могли оставить пользователи, потратившие время на ознакомление с постом).

Поскольку существует масса примеров того, как онлайн-дискуссии прерываются на длительное время, а потом «восстают из пепла», продолжаясь, как и ранее (примером могут служить ветки спортивных форумов, посвященные каким-либо периодическим событиям – чемпионатам, сборам и т.п.), все дискуссии стоит рассматривать, как потенциально незавершенные на данный момент времени. То есть, определить точный момент их окончания и, соответственно, длительность невозможно.

Исходя из этого, предлагается определять длительность дискуссии, как сумму только тех временных интервалов, когда дискуссия была активна:

$$D = \sum d_i,$$

где D – длительность дискуссии, d_i – длительность i-го интервала активности.

В свою очередь, интервалы активности следует определять, как временные промежутки между проявлениями активности пользователей, оставляющих комментарии с реплаями и ставящих лайки, в которых средний темп изменения суммарной интенсивности больше некоторого порогового значения:

$$\{d_i\} = \{t_i - t_{i-1} \mid S_i < T_{min}\},$$

где d_i – длительность i-го интервала активности, t_i, t_{i-1} – моменты времени, ограничивающие i-й интервал активности, S_j – средний темп изменения суммарной интенсивности в момент времени j, T_{min} – пороговое значение для определения среднего темпа изменения интенсивности дискуссии.

На рис. 3 интервалы с достаточным для учета уровнем активности в дискуссии, выделенные серым цветом, определяются как моменты, когда значение тангенса угла наклона касательной к графику больше величины $T_{min}=0,01$. Это соответствует углу наклона касательной примерно в 0,575°, что делает график почти горизонтальным. Это, в свою очередь, означает, что изменения в дискуссии практически отсутствуют. Соответственно, величина D будет вычислена для данного примера как сумма длин этих интервалов активности.

Выводы. Предлагаемые методы оценки темпоральной структуры интернет-дискуссий на основе анализа количества и продолжительности взаимодействий между участниками протестированы на реальных данных, полученных в ходе исследования активности пользователей в нескольких сообществах ВКонтакте, представляющих города Таганрог и Саров.

Данные для анализа представляют собой временные ряды, которые детализированно описывают хронологию активности пользователей в данной социальной сети: это включает такие виды взаимодействий, как написание комментариев к постам, ответы на комментарии других пользователей (реплаи), а также реакцию пользователей на контент

в виде лайков, как к самим постам, так и к комментариям. Указанные данные собраны и структурированы таким образом, чтобы можно было эффективно изучить динамику вовлеченности участников в процессе обсуждения, а также выявить закономерности в активности пользователей и подтвердить правильность предлагаемых методов.

Применение представленных методов оценки интенсивности и длительности дискуссии позволяет получить результаты, которые полностью соответствуют первоначальным ожиданиям, выведенным из гипотез, выдвинутых в ходе подготовки исследования.

Это наглядно проявляется в анализе суточных колебаний активности, где зафиксированы ожидаемые закономерности: низкая активность наблюдалась в ночное время, в то время как дневные часы демонстрировали высокие пики активности с явными колебаниями, особенно ярко выраженными утром и вечером в рабочие дни. Данные результаты подтверждают, что описываемые в работе методы способны корректно показывать характер поведения пользователей в социальных сетях, который является цикличным и шаблонным.

Кроме того, представленные методы позволяют точно идентифицировать всплески активности, которые в большинстве случаев совпадают с важными общественными или политическими событиями, как локального, так и федерального масштаба. Эти всплески активности в дискуссиях явно свидетельствуют о реакции пользователей на события, вызывающие интерес или полемику, что подтверждает эффективность методов для выявления значимых для сообщества событий.

Таким образом, данные результаты не только подтверждают теоретическую обоснованность предложенных методов, но и демонстрируют их практическую применимость для анализа интернет-дискуссий, что может оказать помощь в изучении процессов коллективного обсуждения при онлайн-общении.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление №9 "Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах"

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сердюк А.А.* Особенности агрессивных реакций подростков с разной степенью вовлеченности в социально-культурную деятельность // Инновационная научная современная академическая исследовательская траектория (ИНСАЙТ). – 2022. – № 1 (9). – С. 28-38. – DOI: 10.17853/2686-8970-2022-1-28-38. – EDN EBATOC.
2. *Фофанова Г.А., Позднякова А.В.* Эмоциональный интеллект студентов с различной степенью вовлеченности в электронные социальные сети // Журнал Белорусского государственного университета. Философия. Психология. – 2017. – № 1. – С. 120-126. – EDN XYZQXZ.
3. *Dong X., Lian Y.* A review of social media-based public opinion analyses: Challenges and recommendations // Technology in Society. – 2021. – Vol. 67. – P. 101724. – DOI: 10.1016/j.techsoc.2021.101724.
4. *Юша А.Э.* Методы верификации информации в период постправды // Медиасреда. – 2019. – № 15. – С. 181-187. – EDN OGUFWQ.
5. *Бейненсон В.А.* Проверка достоверности информации в условиях новых медиа: проблемы и возможности // Журналистика в системе альтернативных источников информации: Сб. материалов научной конференции кафедры журналистики, Нижний Новгород, 14 марта 2017 года. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2017. – С. 79-89. – EDN YPRIYB.
6. *Игнатьева И.В., Зедгенизова И.И.* Маркетинг социальных сетей как инструмент продвижения // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 7. – С. 125-129. – EDN UYFEBO.
7. *Татаринов К.А.* Особенности интернет-маркетинга на B2B-рынках // Известия Байкальского государственного университета. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 517-528. – DOI: 10.17150/2500-2759.2018.28(3).517-528. – EDN ZDYJNR.
8. *Masson Z., Parmentier G.* Drivers and mechanisms for online communities performance: A systematic literature review // European Management Journal. – 2023. – Vol. 41 (4). – P. 590-606. – DOI: 10.1016/j.emj.2022.08.005.
9. *Limam H., Slaimi A.* Web Community Management in the Digital Era: Review // Journal of Computer Information Systems. – 10 Jun 2024. – P. 1-15. – DOI: 10.1080/08874417.2024.2361651.

10. *Губенков А.О.* Актуальные проблемы кибербезопасности в социальных сетях // Автономия личности. – 2021. – № 3(26). – С. 46-53. – EDN INGAIE.
11. *Хомяков Д.О.* Сравнительный анализ функционала и возможностей социальных сетей с целью рационального их использования в политическом SMM // Вопросы политологии. – 2021. – Т. 11, № 6 (70). – С. 1930-1942. – DOI: 10.35775/PSI.2021.70.6.037. – EDN DCTDWK.
12. *Глинская А.Р.* Влияние социальных сетей на экономические системы // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Сб. материалов IX Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х т., Красноярск, 10–14 апреля 2023 года. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2023. – С. 481-483. – EDN OKULRQ.
13. *Шагеева Г.Р., Сафиуллин М.Р.* Социальные сети как источник репутационного риска предприятия // Проблемы современной экономики. – 2023. – № 1 (85). – С. 50-53. – EDN CHDUNB.
14. *Качалин Д.В., Вышегородцев М.В., Андреев С.В.* Модель автоматизированной системы анализа тональности публичной деятельности сотрудников предприятия в социальных сетях // Modern Science. – 2020. – № 4-1. – С. 350-359. – EDN VNFVSN.
15. *Yu Y., Jiang J., Dhillon P.S.* Characterizing the Structure of Online Conversations Across Reddit // Proc. ACM Hum.-Comput. Interact. – 2024. – Vol. 8. – P. 23. – DOI: 10.1145/3686913.
16. *Dan Y., Svoboda V. Pennisi.* Analysing interactions in online discussions through social network analysis // Journal of Computer Assisted Learning. – 2022. –Vol. 38 (3). – P. 784-796. – DOI: 10.1111/jcal.12648.
17. *Spatariu A., Hartley K., Bendixen L.D.* Defining and Measuring Quality in Online Discussions // J. Interact. Online Learn. – 2004. – Vol. 2 (4). – P. 1-15.
18. *Chen G., Lo C. K., Hu L.* Sustaining online academic discussions: Identifying the characteristics of messages that receive responses // Computers & Education. – 2020. – Vol. 156. – P. 103938. – DOI: 10.1016/j.compedu.2020.103938.
19. *Schneider S.J., Kerwin J., Frechtling J., Vivari B.A.* Characteristics of the Discussion in Online and Face-to-Face Focus Groups // Social Science Computer Review. – 2002. – No. 20 (1). – P. 31-42. – DOI: 10.1177/089443930202000104.
20. *Samrose S., Hoque E.* Quantifying the Intensity of Toxicity for Discussions and Speakers // 9th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction Workshops and Demos (ACIIW). – 2021. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ACIIW52867.2021.9666258.
21. *Symoneaux R., Galmarini M.V., Mehinagic E.* Comment analysis of consumer's likes and dislikes as an alternative tool to preference mapping. A case study on apples // Food Quality and Preference. – 2012. – Vol. 24, Issue 1. – P. 59-66. – DOI: 10.1016/j.foodqual.2011.08.013.

REFERENCES

1. *Serdyuk A.A.* Osobennosti agressivnykh reaktsiy podrostkov s raznoy stepen'yu vovlechennosti v sotsial'no-kul'turnuyu deyatel'nost' [Features of aggressive behaviors of adolescents with varying degrees of involvement in socio-cultural activity], *Innovatsionnaya nauchnaya sovremennaya akademicheskaya issledovatel'skaya traektoriya (INSAYT)* [Innovative Scientific Modern Academic Research Trajectory (INSAJT)], 2022, No. 1 (9), pp. 28-38. DOI: 10.17853/2686-8970-2022-1-28-38. EDN EBATOC.
2. *Fofanova G.A., Pozdnyakova A.V.* Emotsional'nyy intellekt studentov s razlichnoy stepen'yu vovlechennosti v elektronnye sotsial'nye seti [Emotional intelligence of students with different degrees of involvement in electronic social networks], *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Filosofiya. Psikhologiya* [Journal of the Belarusian State University. Philosophy and Psychology], 2017, No. 1, pp. 120-126. EDN XYZQXZ.
3. *Dong X., Lian Y.* A review of social media-based public opinion analyses: Challenges and recommendations, *Technology in Society*, 2021, Vol. 67, pp. 101724. DOI: 10.1016/j.techsoc.2021.101724.
4. *Yusha A.E.* Metody verifikatsii informatsii v period postpravdy [Methods of information verification in the post-truth period], *Mediasreda* [Media environment], 2019, No. 15, pp. 181-187. EDN OGUFWQ.
5. *Beynenson V.A.* Proverka dostovernosti informatsii v usloviyakh novykh media: problemy i vozmozhnosti [Verification of the reliability of information in the context of new media: problems and opportunities], *Zhurnalistika v sisteme al'ternativnykh istochnikov informatsii: Sb. materialov nauchnoy konferentsii kafedry zhurnalistiki, Nizhniy Novgorod, 14 marta 2017 goda* [Journalism in the system of alternative sources of information: Collection of materials of the scientific conference of the Department of Journalism, Nizhny Novgorod, March 14, 2017]. Nizhniy Novgorod: Natsional'nyy issledovatel'skiy Nizhegorodskiy gosudarstvennyy universitet im. N.I. Lobachevskogo, 2017, pp. 79-89. EDN YPRIYB.
6. *Ignat'eva I.V., Zedgenizova I.I.* Marketing sotsial'nykh setey kak instrument prodvizheniya [Social media marketing as a promotion tool], *Innovatsii i investitsii* [Innovations and Investments], 2019, No. 7, pp. 125-129. EDN UYFEBO.

7. *Tatarinov K.A.* Osobennosti internet-marketinga na B2B-rynkakh [Features of internet marketing on b2b-markets], *Izvestiya Baykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [News of the Baikal State University], 2018, Vol. 28, No. 3, pp. 517-528. DOI: 10.17150/2500-2759.2018.28(3).517-528. EDN ZDYJNR.
8. *Masson Z., Parmentier G.* Drivers and mechanisms for online communities performance: A systematic literature review, *European Management Journal,* 2023, Vol. 41 (4), pp. 590-606. DOI: 10.1016/j.emj.2022.08.005.
9. *Limam H., Slaimi A.* Web Community Management in the Digital Era: Review, *Journal of Computer Information Systems,* 10 Jun 2024, pp. 1-15. DOI: 10.1080/08874417.2024.2361651.
10. *Gubenkov A.O.* Aktual'nye problemy kiberbezopasnosti v sotsial'nykh setyakh [Current problems of cybersecurity in social networks], *Avtonomiya lichnosti* [Autonomy of the Individual], 2021, No. 3 (26), pp. 46-53. EDN INGAIE.
11. *Khomyakov D.O.* Sravnitel'nyy analiz funktsionala i vozmozhnostey sotsial'nykh setey s tsel'yu ratsional'nogo ikh ispol'zovaniya v politicheskom SMM [Comparative analysis of the functionality and possibilities of social networks for the purpose of their rational use in political SMM], *Voprosy politologii* [Questions of Political Science], 2021, Vol. 11, No. 6 (70), pp. 1930-1942. DOI: 10.35775/PSI.2021.70.6.037. EDN DCTDWK.
12. *Glinskaya A.R.* Vliyanie sotsial'nykh setey na ekonomicheskie sistemy [The impact of social media on economic systems], *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki: Sb. materialov IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu kosmonavtiki. V 3-kh t., Krasnoyarsk, 10–14 aprelya 2023 goda* [Actual problems of aviation and cosmonautics: Collection of materials of the IX International scientific and practical conference dedicated to Cosmonautics Day. In 3 volumes, Krasnoyarsk, April 10-14, 2023]. Krasnoyarsk: Sibirskiy gosudarstvennyy universitet nauki i tekhnologiy imeni akademika M.F. Reshetneva, 2023, pp. 481-483. EDN OKULRQ.
13. *Shageeva G.R., Safiullin M.R.* Sotsial'nye seti kak istochnik reputatsionnogo riska predpriyatiya [Social networks as a source of the reputational risk of an enterprise], *Problemy sovremennoy ekonomiki* [Problems of the Modern Economy], 2023, No. 1 (85), pp. 50-53. EDN CHDUNB.
14. *Kachalin D.V., Vyshegorodtsev M.V., Andreev S.V.* Model' avtomatizirovannoy sistemy analiza tonal'nosti publichnoy deyatel'nosti sotrudnikov predpriyatiya v sotsial'nykh setyakh [Model of an automated system for analyzing the tonality of public activities of enterprise employees in social networks], *Modern Science,* 2020, No. 4-1, pp. 350-359. EDN VNFVSN.
15. *Yu Y., Jiang J., Dhillon P.S.* Characterizing the Structure of Online Conversations Across Reddit, *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, 2024, Vol. 8, pp. 23. DOI: 10.1145/3686913.
16. *Dan Y., Svoboda V. Pennisi.* Analysing interactions in online discussions through social network analysis, *Journal of Computer Assisted Learning,* 2022, Vol. 38 (3), pp. 784-796. DOI: 10.1111/jcal.12648.
17. *Spatariu A., Hartley K., Bendixen L.D.* Defining and Measuring Quality in Online Discussions, *J. Interact. Online Learn,* 2004, Vol. 2 (4), pp. 1-15.
18. *Chen G., Lo C.K., Hu L.* Sustaining online academic discussions: Identifying the characteristics of messages that receive responses, *Computers & Education,* 2020, Vol. 156, pp. 103938. DOI: 10.1016/j.compedu.2020.103938.
19. *Schneider S.J., Kerwin J., Frechtling J., Vivari B.A.* Characteristics of the Discussion in Online and Face-to-Face Focus Groups, *Social Science Computer Review,* 2002, No. 20 (1), pp. 31-42. DOI: 10.1177/089443930202000104.
20. *Samrose S., Hoque E.* Quantifying the Intensity of Toxicity for Discussions and Speakers, *9th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction Workshops and Demos (ACIIW),* 2021, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ACIIW52867.2021.9666258.
21. *Symoneaux R., Galmarini M.V., Mehinagic E.* Comment analysis of consumer's likes and dislikes as an alternative tool to preference mapping. A case study on apples, *Food Quality and Preference,* 2012, Vol. 24, Issue 1, pp. 59-66. DOI: 10.1016/j.foodqual.2011.08.013.

Таранов Антон Юрьевич – Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных и управляющих систем»; e-mail: mailfortexas@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634360376; м.н.с.

Taranov Anton Yuryevich – Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer and Control Systems, Co Ltd; e-mail: mailfortexas@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634360376; junior researcher.

УДК 004.8 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-163-173

А.Н. Целых, В.С. Васильев, Л.А. Целых, С.А. Барковский

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ГРАФОВ ПРИ ОТСУТСТВИИ НАБЛЮДАЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Статья посвящена решению основной обратной задачи спектральной теории графов – определении основных параметров графа по спектру его собственных значений. В данной работе нас интересуют когнитивные причинные графовые модели сложных систем, динамика переменных которых недоступна. Мы рассматриваем нестохастические графовые модели, которые имеют нечисловые значения узлов и связей, а также плохо определенные системные факторы. При отсутствии исходных данных решение обратной задачи для направленного взвешенного знакового графа становится значительно более сложным. Когда графы имеют одинаковую топологию, но разные веса на дугах, то их спектры образуют в пространстве решений некоторое множество нечетких коллинеарных векторов. Линии этих векторов расходятся в пространстве векторов из-за их направленности к разным вершинам. В данной работе предлагается использовать алгоритм, позволяющий точно восстановить веса когнитивного графа, когда известен условный главный собственный вектор и топологический шаблон матрицы смежности. Данный алгоритм учитывает важную особенность матрицы смежности графа – направление главного собственного вектора к целевой вершине, что позволяет найти правильное решение из набора нечетких коллинеарных векторов в пространстве решений. Для того, чтобы добиться полного восстановления весов графа с приемлемой точностью предлагается объединить спектр графа и модель эффективную управления с задачей комбинаторной оптимизации. Восстанавливая веса матрицы смежности с использованием нашего подхода, мы сравниваем их с заданным графом. При сравнении учитываются такие параметры графа, как спектр графа, коэффициенты подобия для реконструированной матрицы, векторы отклика и управления.

Спектральная теория графов; спектр собственных значений; направленный взвешенный знаковый граф; восстановление весов графа.

A.N. Tselykh, V.S. Vasilev, L.A. Tselykh, S.A. Barkovskii

SOLUTION OF THE INVERSE PROBLEM OF SPECTRAL GRAPH THEORY IN THE ABSENCE OF OBSERVABLE VARIABLES

The article is devoted to solving the main inverse problem of spectral graph theory – determining the main parameters of a graph based on the spectrum of its eigenvalues. The article studies cognitive causal graph models of complex systems with unknown dynamics of variables. Non-stochastic graph models with non-numeric values of nodes and links, as well as poorly defined system factors are considered. In the absence of initial data, solving the inverse problem for a directed weighted signed graph is significantly complicated. When graphs have the same topology but different weights on arcs, their spectra form a set of fuzzy collinear vectors in the solution space. The straight lines of these vectors diverge in the vector space due to their directionality to different vertices. The article proposes to use an algorithm that allows one to accurately restore the weights of a cognitive graph when the conditional principal eigenvector and the topological structure of the adjacency matrix are known. This algorithm takes into account an important feature of the adjacency matrix of the graph - the direction of the main eigenvector to the target vertex, which allows finding the correct solution from a set of fuzzy collinear vectors in the solution space. To achieve complete restoration of the graph weights with acceptable accuracy, it is proposed to combine the graph spectrum and the effective control model with the combinatorial optimization problem. Restoring the adjacency matrix weights using our approach, we compare them with the given graph. The comparison takes into account such graph parameters as the graph spectrum, similarity coefficients of the restored matrix, response and control vectors.

Spectral graph theory; eigenvalue spectrum; directed weighted signed graph; graph weight recovery.

Введение. Основная обратная задача в спектральной теории графов состоит в определении параметров графа по его спектру собственных значений [1] . В данной работе нас интересуют когнитивные причинные модели (КМ) сложных систем (социальных, социально-экономических и политических), динамика переменных которых недоступна. Мы рассматриваем нестохастические КМ, которые имеют качественные и нечисловые узлы и связи, ненаблюдаемые переменные и плохо определенные системные факторы при отсутствии возможности получения данных временных рядов [2] . Эти модели представлены направленными

взвешенными знаковыми графами с циклами. Моделирование интересующих нас систем осуществляется с помощью экспертных суждений, полученных непосредственно от человека или собранных из его опубликованных мнений. Это предопределяет высокую степень субъективности и неточности при определении весов на дугах графа.

Как отмечено в [3], характер смежности графа закодирован в весах его дуг. Даже незначительные неточности в весах могут существенно исказить модель, что может привести к неверным решениям на основе такой модели. Поэтому веса в графе могут быть уточнены с использованием особенности, присущей этому классу сложных систем. Представляется, что таким признаком может быть общая направленность модели, соответствующая тактической или стратегической цели моделируемой системы в ситуации принятия управленческих решений. Этот признак может быть выражен в терминах спектра графа. Как отмечено в [4], спектральный анализ дает представление о структурных и семантических свойствах графа. Направление главного вектора указывает на общую направленность системы.

В данном исследовании мы предлагаем алгоритм, который может точно реконструировать веса графа из одного условного главного собственного вектора и топологической модели матрицы смежности графа.

Существующие методы реконструкции графов направлены на генерацию графов, спектр Лапласа которых приблизительно соответствует спектру заданного входного графа, и чьи топологические метрики соответствуют заданному шаблону графа [3, 5–7]. Структурная реконструкция выполняется на основе исходного случайного графа, к которому применяется процесс перемонтирования ребер для соответствия собственным значениям Лапласа заданного графа [8]. В этом случае топологические свойства графа оцениваются с использованием метрик локальных параметров графа: центральностей посредничества, степени, коэффициентов кластеризации, распределения степеней и распределения длин кратчайших путей и т. д. То есть реконструкция точной топологии в виде набора смежностей и весов не была предусмотрена. В последние годы с развитием алгоритмов глубокого обучения графов был разработан ряд методов реконструкции сетей с использованием наблюдаемых и измеренных данных, включая следующие: методы высокоточной реконструкции сетей из измеримых данных временных рядов [9], методы, основанные на корреляциях, вызванных шумом [10], методы, основанные на долговременном стационарном отклике на постоянное во времени воздействие [11] и др. Эти результаты неприменимы к задачам определения точной топологии графа, а также при отсутствии наблюдаемых и измеримых признаков узлов.

Цель данной статьи – выйти за эти рамки, предложив метод, позволяющий восстанавливать веса графа при отсутствии наблюдаемых и измеримых переменных.

1. Метод восстановления веса графа. ***1.1. Постановка задачи.*** Оптимизационная задача реконструкции весов графа решается в два этапа: а) получение условного главного собственного вектора (пары векторов управления и отклика) путем решения оптимизационной задачи максимизации влияния (3) и б) получение реконструированных весов графа путем решения оптимизационной задачи (4) по шаблону матрицы смежности в допустимых границах.

Пусть модель управления $\mathscr{H} := \langle \boldsymbol{u}, \boldsymbol{x} | \boldsymbol{A}^T, \delta \rangle$ задана системой линейных уравнений (СЛАУ) (4) с ограничениями $\boldsymbol{N}$ на вектор воздействия управления $\boldsymbol{u}$ и вектор реакции $\boldsymbol{x}$:

$$(\boldsymbol{I} - \delta \boldsymbol{A})\boldsymbol{x} = \boldsymbol{u}, \tag{1}$$

где $\boldsymbol{I}$ – единичная матрица , δ - коэффициент затухания (DF), $\boldsymbol{A}^T$ – матрица смежности, где $a_{i,j}$ ($1 \le i, j \le n$) — весовой элемент матрицы $\mathbf{A} = \left(a_{i,j}\right)_{n \times n}$, n – количество вершин в графе . По определению, $\mathbf{Z} = \mathbf{I} - \delta \mathbf{A}$, где $\mathbf{Z}$ – матрица перехода. С учетом (1) для получения пары векторов $\mathbf{x}$ и $\mathbf{u}$, выражающих эффективное управление, необходимо оптимизировать следующую нелинейную задачу оптимизации:

$$\frac{\mathbf{x}^T\mathbf{x}}{\mathbf{u}^T\mathbf{u}} = \frac{\|\mathbf{x}\|^2}{\|\mathbf{u}\|^2} = \frac{\mathbf{x}^T\mathbf{x}}{\mathbf{B}\mathbf{x}^T\mathbf{x}} \to \max, \tag{2}$$

где $\mathbf{B}=\mathbf{Z}^T\mathbf{Z}$ – матрица квадратичной формы. Тогда, учитывая (1), ограничения переводятся в матричную запись $\mathbf{C}=\left(\mathbf{N}^T\mathbf{N}\right)^{-1}\mathbf{N}^T\left(\mathbf{I}-\delta\mathbf{A}\right)$. Матрица ограничений $\mathbf{N}=\left(\mathbf{n}_1 \quad \mathbf{n}_2 \quad \ldots \quad \mathbf{n}_L\right)$ имеет $L=\left|N^{(0)}\right|+\left|N^{(+)}\right|+\left|N^{(-)}\right|$ столбцы и n строки , где j столбец матрицы $\mathbf{N}$ определяется как $\mathbf{n}_j=\pm\delta_j^i$. $\delta_j^i=\left[i=j\right]$ – дельта Кронекера, которая имеет значение $n_j^i=\delta_j^i$ для $j\in N^{(0)}$ для $j\in N^{(+)}$, и $n_j^i=-\delta_j^i$ для $j\in N^{(-)}$. $N^{(0)}$, $N^{(+)}$ и $N^{(-)}$ обозначают наборы индексов вершин с ограничениями для управления воздействиями $\mathbf{u}$, где $N^{(0)}=\left\{i\,\middle|\,u_i=0;1\le i\le n\right\}$ – набор индексов неконтролируемых вершин; $N^{(+)}=\left\{j\,\middle|\,u_j\ge 0;1\le j\le n\right\}$ и $N^{(-)}=\left\{k\,\middle|\,u_k\le 0;1\le k\le n\right\}$ представляют собой наборы индексов вершин с ограничениями в положительном/отрицательном направлении управления соответственно.

Задача (2) сводится к задаче квадратичного программирования (3) относительно вектора $\mathbf{x}$ (или $\mathbf{u}$) при линейных ограничениях $\mathbf{Cx}\ge\mathbf{0}$ и нелинейном условии нормализации $(\mathbf{x}_m,\mathbf{x}_m)=1$:

$$\mathbf{x}_m^T\mathbf{B}\mathbf{x}_m\to\min \quad \mathbf{x}_m^T\mathbf{x}_m=1,\ \mathbf{x}_k^T\mathbf{B}\mathbf{x}_m=0,\ 1\le k\le m-1,\ \mathbf{C}\mathbf{x}_m\ge\mathbf{0}, \tag{3}$$

где $\mathbf{x}_k$, $1\le k\le m$ – векторы отклика, m – число пар векторов воздействия и отклика, используемых для оптимизации. В этих задачах, $\mathbf{x}_1$, $\mathbf{x}_2$ …, $\mathbf{x}_k$, последовательно определялись из условий попарной ортогональности воздействий ($\mathbf{x}_l^T\mathbf{B}\mathbf{x}_k=0$, $1\le l\le k$). Матрица $\mathbf{A}$ (и $\mathbf{B}$) оставалась неизменной.

Решается задача восстановления матрицы. $\mathbf{A}$ Подставляя $\mathbf{Zx}$ в $\mathbf{u}$ (2) и учитывая, что $\|\mathbf{Z}\|$ – норма матрицы, индуцированная нормой вектора $\|\mathbf{x}\|$, получаем задачу оптимизации для $\mathbf{Z}$ в форме квадратичного программирования по (4):

$$\begin{cases}\mathbf{x}_m^T\mathbf{B}\mathbf{x}_m=\|\mathbf{Z}\mathbf{x}_m\|^2=\|(\mathbf{I}-\delta\mathbf{A})\mathbf{x}_m\|^2\to\min\\ \mathbf{Z}\mathbf{x}_k=\mathbf{u}_k,\ 1\le k\le m-1\\ \mathbf{S}\le\mathbf{Z}\le\mathbf{T}\end{cases}, \tag{4}$$

где $\mathbf{u}_k$, $1\le k\le m$ – векторы (попарно ортогональные) оптимальных управляющих воздействий; $\mathbf{S}=\left(s_{i,j}\right)_{1\le i,j\le n}$ и $\mathbf{T}=\left(t_{i,j}\right)_{1\le i,j\le n}$ – матрицы нижних и верхних границ для переменных ограничений ($s_{i,j}\le z_{i,j}$, $1\le j\le n$; $z_{i,j}\le t_{i,j}$, $1\le j\le n$); $\mathbf{U}=\left(u_{i,k}\right)_{1\le i\le n,\,1\le k\le m}$ и $\mathbf{X}=\left(x_{i,k}\right)_{1\le i\le n,\,1\le k\le m}$ – матрицы векторов воздействия и реакции.

В ограничениях задачи (4) используются $m-1$ пары векторов $\mathbf{x}_k$, $\mathbf{u}_k$, $1\le k\le m-1$ и вектор $\mathbf{x}_m$. Объектом минимизации задачи (4) является норма вектора $\|\mathbf{u}_m\|$.

1.2. Алгоритм решения задачи. Функция Лагранжа для задачи (4) имеет следующий вид:

$$\mathrm{L}=\tfrac{1}{2}\|\mathbf{Z}\mathbf{x}_m\|^2+\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{m-1}y_{i,k}\left(u_{i,k}-\mathbf{z}_i\mathbf{x}_k\right)+\sum_{i=1}^{n}\left(\mathbf{s}_i-\mathbf{z}_i\right)\mathbf{w}_i^T+\sum_{i=1}^{n}\left(\mathbf{z}_i-\mathbf{t}_i\right)\mathbf{w}_i^T\to\min, \tag{5}$$

где $\mathbf{y}_k$, $1\le k\le m-1$ и $\mathbf{w}_i$, $1\le i\le n$ – множители Лагранжа, соответствующие ограничениям в виде равенств и неравенств соответственно; $\mathbf{a}_i$, $\mathbf{s}_i$, $\mathbf{t}_i$, $\mathbf{w}_i$, $1\le i\le n$ – строки матриц $\mathbf{A}$, $\mathbf{S}$, $\mathbf{T}$, $\mathbf{W}$.

Если для некоторых i и j выполняются $s_{i,j} \le a_{i,j}$ равенство $s_{i,j} = t_{i,j}$ и неравенство, а ограничения $s_{i,j} < t_{i,j}$ и $a_{i,j} \le t_{i,j}$ не могут быть активными одновременно, то $w_{i,j}$ достаточно одного множителя. Поэтому $\mathbf{w}_i$ для хранения множителей $w_{i,j}$, достаточно одного вектора $1 \le j \le n$. Тогда нет неоднозначности среди членов последних двух сумм в лагранжиане L. Для лучшего понимания мы также будем различать векторы $\breve{\mathbf{w}}_\mathbf{i}$ и $\hat{\mathbf{w}}_\mathbf{i}$. Компоненты векторов $\breve{\mathbf{w}}_\mathbf{i}$ и $\hat{\mathbf{w}}_\mathbf{i}$ равны нулю или содержат ненулевые значения множителей, $w_{i,j}$ соответствующих активным ограничениям $s_{i,j} \le a_{i,j}$ и $a_{i,j} \le t_{i,j}$, соответственно.

Лагранжиан (5) можно записать покомпонентно как:

$$\mathrm{L} = \tfrac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\left(\mathbf{z}_i\mathbf{x}_m\right)^2 + \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{m-1} y_{i,k}\left(u_{i,k} - \mathbf{z}_i\mathbf{x}_k\right) + \sum_{i=1}^{n}\left(\mathbf{s}_i - \mathbf{z}_i\right)\breve{\mathbf{w}}_i^T + \sum_{i=1}^{n}\left(\mathbf{z}_i - \mathbf{t}_i\right)\hat{\mathbf{w}}_i^T \to \min . \qquad (6)$$

В используемом ниже методе множителей Лагранжа второго порядка [12, 13] активность или неактивность ограничений в виде неравенств указывается только знаком (а не значением) соответствующего множителя $w_{i,j}$. Такой же знак будет присвоен и $\delta w_{i,j}$. Связка множителей с ФР позволяет не ссылаться явно на значение n в итерационном процессе и не требует его передачи в функцию алгоритма программного блока.

Необходимые условия минимума модифицированной функции Лагранжа [12, 13] имеют вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \mathrm{L}}{\partial z_{i,j}} = \mathbf{z}_i\mathbf{x}_m x_{j,m} - \sum\limits_{k=1}^{m-1} y_{i,k}x_{j,k} - \breve{w}_{i,j} + \hat{w}_{i,j} = 0, \quad 1 \le i, j \le n, \\ \dfrac{\partial \mathrm{L}}{\partial y_{i,j}} = u_{i,j} - \mathbf{z}_i\mathbf{x}_j = 0, \quad 1 \le i \le n, \quad 1 \le j \le m-1, \\ \dfrac{\partial \mathrm{L}}{\partial w_{i,j}} = \begin{cases} p^{-1}\max\left(0; \breve{w}_{i,j} + p\left(s_{i,j} - a_{i,j}\right)\right) - p^{-1}\breve{w}_{i,j} = 0, & a_{i,j} < \frac{1}{2}\left(s_{i,j} + t_{i,j}\right), \quad 1 \le i, j \le n, \\ p^{-1}\max\left(0; \hat{w}_{i,j} + p\left(a_{i,j} - t_{i,j}\right)\right) - p^{-1}\hat{w}_{i,j} = 0, & a_{i,j} \ge \frac{1}{2}\left(s_{i,j} + t_{i,j}\right), \quad 1 \le i, j \le n, \end{cases} \end{cases} \qquad (7)$$

где p – параметр квадратичного штрафа, заданный в качестве входных данных.

Векторно-матричная форма директив имеет вид:

$$\mathbf{z}_i\mathbf{x}_m\mathbf{x}_m^T = \mathbf{y}_i\mathbf{X}_{m-1}^T + \breve{\mathbf{w}}_i - \hat{\mathbf{w}}_i, \ \mathbf{z}_i\mathbf{X}_{m-1} = \left(u_{i,j}\right)_{1\times(m-1)}, \ 1 \le i \le n, \qquad (8)$$

где $\mathbf{e}_i$ – канонический базисный вектор ($e_{i,i} = 1$, $e_{i,j} = 0$, $j \ne i$, $1 \le i, j \le n$).

Внешнее произведение $\mathbf{x}_m\mathbf{x}_m^T$ – положительно полуопределенная матрица. Порядок этой матрицы равен $n \times n$, а ранг равен единице, поэтому регуляризация по Тихонову и Арсенину [14] Требуется линеаризованная система (уравнение 2) необходимых условий минимума модифицированной функции Лагранжа по Берцекасу [13] с регуляризацией по Тихонову и Арсенину [14] имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \mathbf{z}_i^{(\sigma+1)}\left(\alpha\mathbf{I} + \mathbf{x}_m\mathbf{x}_m^T\right) = \mathbf{y}_i^{(\sigma+1)}\mathbf{X}_{m-1}^T + \breve{\mathbf{w}}_i^{(\sigma+1)} - \hat{\mathbf{w}}_i^{(\sigma+1)} + \alpha\mathbf{z}_i^{(\sigma)}, \quad 1 \le i \le n, \\ \mathbf{z}_i^{(\sigma+1)}\mathbf{X}_{m-1} = \left(u_{i,j}\right)_{1\times(m-1)}, \quad 1 \le i \le n, \\ \begin{cases} z_{i,j}^{(\sigma+1)} = s_{i,j}, & z_{i,j}^{(\sigma)} \le s_{i,j} + w_{i,j}^{(\sigma)}/p, \\ \breve{w}_{i,j}^{(\sigma+1)} = 0, & z_{i,j}^{(\sigma)} > s_{i,j} + w_{i,j}^{(\sigma)}/p, \end{cases} \quad z_{i,j}^{(\sigma)} < \tfrac{1}{2}\left(s_{i,j} + t_{i,j}\right), \quad 1 \le i, j \le n, \\ \begin{cases} z_{i,j}^{(\sigma+1)} = t_{i,j}, & z_{i,j}^{(\sigma)} \ge t_{i,j} - w_{i,j}^{(\sigma)}/p, \\ \hat{w}_{i,j}^{(\sigma+1)} = 0, & z_{i,j}^{(\sigma)} < t_{i,j} - w_{i,j}^{(\sigma)}/p, \end{cases} \quad z_{i,j}^{(\sigma)} \ge \tfrac{1}{2}\left(s_{i,j} + t_{i,j}\right), \quad 1 \le i, j \le n, \end{cases} \qquad (9)$$

где $\alpha > 0$ – параметр регуляризации; σ – номер итерации. Собственное значение матрицы, $\mathbf{x}_m\mathbf{x}_m^T$ соответствующее условному собственному вектору $\mathbf{x}_m$, с учетом $\|\mathbf{x}_m\| = 1$ равно $\lambda = 1$. Все остальные собственные значения, соответствующие условным собственным векторам, ортогональным, $\mathbf{x}_m$ равны $\lambda = 0$. Соответственно, собственные значения матрицы $\alpha\mathbf{I} + \mathbf{x}_m\mathbf{x}_m^T$ равны $\lambda = \alpha + 1$ для условного собственного вектора $\mathbf{x}_m$ и $\lambda = \alpha$ для остальных условных собственных векторов, ортогональных $\mathbf{x}_m$.

Алгоритм решения задачи оптимизации (4) представлен в табл. 1.

Таблица 1

Алгоритм реконструкции весов направленного графа с помощью условного главного собственного вектора

Вход : n, m, $\mathbf{S}$, $\mathbf{T}$, $\mathbf{U}$, $\mathbf{X}$, α, ρ, ε;

для того, $i := 1$ чтобы n сделать

$\mathbf{z}_i \leftarrow (0 \quad 0 \quad \ldots \quad 0)$; $\mathbf{w} \leftarrow (0 \quad 0 \quad \ldots \quad 0)$; $o \leftarrow TRUE$

пока (o);

$\mathbf{c} \leftarrow (0 \quad 0 \quad \ldots \quad 0)$; $V \leftarrow \varnothing$; $Q \leftarrow \varnothing$;

для того, $j := 1$ чтобы n сделать

$Q \leftarrow \left\{ j \middle| \left(z_{i,j} > s_{i,j} + w_j / p\right) \vee \left(z_{i,j} < t_{i,j} - w_j / p\right) \right\}$

$V \leftarrow \{1,2,\ldots,n\} \setminus Q$

если $m > 1$ затем

$\mathbf{y} \leftarrow (0 \quad 0 \quad \ldots \quad 0)$;

если $V \neq \varnothing$ затем

$\mathbf{b} \leftarrow \left(\alpha\tilde{\mathbf{z}}_i - \left(\mathbf{z}_i\mathbf{x}_m - \tilde{\mathbf{z}}_i\tilde{\mathbf{x}}_m\right)\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)^{-1}$;

$\tilde{\mathbf{G}}_{m-1}^T \leftarrow \tilde{\mathbf{X}}_{m-1}^T\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)^{-1}$; $\mathbf{y} \leftarrow \left(\tilde{\mathbf{G}}_{m-1}^T\tilde{\mathbf{X}}_{m-1}\right)^{-1}\left(\mathbf{u}_i - \tilde{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{X}}_{m-1}\right)$;

$\tilde{\mathbf{c}} \leftarrow \mathbf{y}\tilde{\mathbf{G}}_{m-1}^T + \tilde{\mathbf{b}}$;

$q \leftarrow \mathbf{c}\mathbf{x}_m$

$$\forall j \in Q : w_j \leftarrow \begin{cases} \sum_{k=1}^{m-1} y_k x_{j,k} - q x_{j,m} - \alpha\left(t_{i,j} - z_{i,j}\right) & \text{if } \left|z_{i,j} - s_{i,j}\right| > \left|t_{i,j} - z_{i,j}\right| \\ q x_{j,m} - \sum_{k=1}^{m-1} y_k x_{j,k} - \alpha\left(z_{i,j} - s_{i,j}\right) & \text{if } \left|z_{i,j} - s_{i,j}\right| \le \left|t_{i,j} - z_{i,j}\right| \end{cases};$$

еще

если $V \neq \varnothing$ затем $\tilde{\mathbf{c}} \leftarrow \left(\alpha\tilde{\mathbf{z}}_i - \left(\mathbf{z}_i\mathbf{x}_m - \tilde{\mathbf{z}}_i\tilde{\mathbf{x}}_m\right)\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)^{-1}$;

$q \leftarrow \mathbf{c}\mathbf{x}_m$;

$$\forall j \in Q : w_j \leftarrow \begin{cases} -\alpha\left(t_{i,j} - z_{i,j}\right) - q x_{j,m} & \text{if } \left|z_{i,j} - s_{i,j}\right| > \left|t_{i,j} - z_{i,j}\right| \\ -\alpha\left(z_{i,j} - s_{i,j}\right) + q x_{j,m} & \text{if } \left|z_{i,j} - s_{i,j}\right| \le \left|t_{i,j} - z_{i,j}\right| \end{cases};$$

$o \leftarrow FALSE$;

для того, $j := 1$ чтобы n сделать

если (($c_j < s_{i,j} - \varepsilon$) ИЛИ ($c_j > t_{i,j} + \varepsilon$) ИЛИ ($w_j < -\varepsilon$)) то $o \leftarrow TRUE$

$\mathbf{z}_i \leftarrow \mathbf{c}$;

Выход : $\mathbf{Z}$.

1.3. Доказательство сходимости

Теорема. Пусть итерационный процесс задан уравнением (9). Тогда проекции $\mathbf{z}_i^{(\sigma)}\mathbf{x}_m$ приближений процесса (9) слабо сходятся к проекциям $\mathbf{z}_i\mathbf{x}_m$ решения задачи (4).

Доказательство. Поскольку в области безусловной минимизации положения компонент вектора, $\mathbf{z}_i^{(\sigma)}$ соответствующих условиям $z_{i,j}^{(\sigma)} = s_{i,j}$, $s_{i,j} < z_{i,j}^{(\sigma)} < t_{i,j}$, $z_{i,j}^{(\sigma)} = t_{i,j}$, строки матрицы $\mathbf{x}_{m-1}$, составляющие матрицу $\tilde{\mathbf{X}}_{m-1}$, а также $\tilde{\mathbf{I}}$, $\tilde{\mathbf{e}}_i$ и $\tilde{\mathbf{x}}_m$, не зависят от номера итерации σ, то отсюда следует, что задачу (6) можно переписать в следующем виде (16):

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right) = \mathbf{y}_i^{(\sigma)}\tilde{\mathbf{X}}_{m-1}^T + \alpha\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma-1)} - \tilde{\mathbf{d}}_i^{(\sigma-1)} \\ \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\tilde{\mathbf{X}}_{m-1} = \left(u_{i,j}\right)_{1\times(m-1)} \end{cases} \quad 1 \le i \le n, \tag{10}$$

где компоненты векторов $\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}$, $\tilde{\mathbf{x}}_m$, и $\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma-1)}$, строки матрицы $\tilde{\mathbf{X}}_{m-1}$, а также строки и столбцы матрицы, $\tilde{\mathbf{I}}$ соответствующие неактивным ограничениям $s_{i,j} < z_{i,j}^{(\sigma)} < t_{i,j}$, $1 \le j \le n$ и $\tilde{\mathbf{d}}_i^{(\sigma-1)} = \left(\mathbf{z}_i^{(\sigma-1)}\mathbf{x}_m - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma-1)}\tilde{\mathbf{x}}_m\right)\tilde{\mathbf{x}}_m^T$. Поскольку в области безусловной минимизации $\mathbf{z}_i^{(\sigma)}\mathbf{x}_m - \mathbf{z}_i^{(\sigma-1)}\mathbf{x}_m = \left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma-1)}\right)\tilde{\mathbf{x}}_m$, имеем $\tilde{\mathbf{d}}_i^{(\sigma)} = \tilde{\mathbf{d}}_i^{(\sigma-1)} = \tilde{\mathbf{d}}_i$. Тогда квадратичная форма (10) имеет вид

$$\begin{aligned} &\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T = \left(\mathbf{y}_i^{(\sigma+1)}\tilde{\mathbf{X}}_{m-1}^T + \alpha\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)} - \tilde{\mathbf{d}}_i^{(\sigma)}\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T = \\ &= \mathbf{y}_i^{(\sigma+1)}\left(\left(u_{i,j}\right)_{1\times(m-1)} - \left(u_{i,j}\right)_{1\times(m-1)}\right) + \left(\alpha\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)} - \tilde{\mathbf{d}}_i\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T = \left(\alpha\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)} - \tilde{\mathbf{d}}_i\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T. \end{aligned} \tag{11}$$

Используя неравенство Коши-Шварца [15] и неравенство между средним геометрическим и средним арифметическим для членов $\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T$ и $\alpha\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\right)^T$ можно записать:

$$\begin{aligned} &\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T \le \\ &\le \sqrt{\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T}\sqrt{\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\right)^T} \le, \\ &\le \tfrac{1}{2}\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T + \tfrac{1}{2}\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\right)^T \end{aligned} \tag{12}$$

$$\alpha\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\right)^T \le \alpha\sqrt{\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T}\sqrt{\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\right)^T} \le \tfrac{1}{2}\alpha\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T + \tfrac{1}{2}\alpha\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\right)^T. \tag{13}$$

Используя (11), (12) и (13), получаем

$$\begin{aligned} &\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\right)^T = \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T + \left(\alpha\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)} - \tilde{\mathbf{d}}_i\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T \le \\ &\le \tfrac{1}{2}\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\right)^T + \tfrac{1}{2}\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T + \\ &+ \tfrac{1}{2}\alpha\left\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\right\|^2 - \tfrac{1}{2}\alpha\left\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right\|^2 - \tilde{\mathbf{d}}_i\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T \end{aligned}. \tag{14}$$

Квадратичная форма (14) имеет вид

$$\begin{aligned} &\tfrac{1}{2}\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\tilde{\mathbf{x}}_m\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\tilde{\mathbf{x}}_m\right)^T + \tfrac{1}{2}\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\tilde{\mathbf{d}}_i^T + \tfrac{1}{2}\tilde{\mathbf{d}}_i\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\right)^T + \tfrac{1}{2}\tilde{\mathbf{d}}_i\tilde{\mathbf{d}}_i^T \le \\ &\le \tfrac{1}{2}\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\tilde{\mathbf{x}}_m\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\tilde{\mathbf{x}}_m\right)^T + \tfrac{1}{2}\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\tilde{\mathbf{d}}_i^T + \tfrac{1}{2}\tilde{\mathbf{d}}_i\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T + \tfrac{1}{2}\tilde{\mathbf{d}}_i\tilde{\mathbf{d}}_i^T \end{aligned}. \tag{15}$$

Это подразумевает, что

$$\left|\mathbf{z}_i^{(\sigma+1)}\mathbf{x}_m\right| \le \left|\mathbf{z}_i^{(\sigma)}\mathbf{x}_m\right|, \tag{16}$$

откуда следует, что проекции $\mathbf{z}_i^{(\sigma)}\mathbf{x}_m$ слабо сходятся к проекциям $\mathbf{z}_i\mathbf{x}_m$ ($\mathbf{z}_i^{(\sigma)}\mathbf{x}_m \to \mathbf{z}_i\mathbf{x}_m$).

По разностям (10) получаем

$$\begin{cases} \left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right) = \left(\mathbf{y}_i^{(\sigma+1)} - \mathbf{y}_i^{(\sigma)}\right)\tilde{\mathbf{X}}_{m-1}^T + \alpha\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma-1)}\right) \\ \left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)\tilde{\mathbf{X}}_{m-1} = \left(u_{i,j}\right)_{1\times(m-1)} - \left(u_{i,j}\right)_{1\times(m-1)} = \mathbf{0} \end{cases} \quad 1 \le i \le n. \tag{17}$$

Тогда квадратичная форма (17) имеет вид

$$\begin{aligned} &\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T = \\ &= \left(\left(\mathbf{y}_i^{(\sigma+1)} - \mathbf{y}_i^{(\sigma)}\right)\tilde{\mathbf{X}}_{m-1}^T + \alpha\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma-1)}\right)\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T = . \\ &= \left(\mathbf{y}_i^{(\sigma+1)} - \mathbf{y}_i^{(\sigma)}\right)\left(\mathbf{u}_i^T - \mathbf{u}_i^T\right) + \alpha\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma-1)}\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T \end{aligned} \tag{18}$$

Затем

$$\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)\left(\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T = \alpha\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma-1)}\right)\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)^T, \tag{19}$$

что подразумевает

$$\left\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right\|^2_{\alpha\tilde{\mathbf{I}} + \tilde{\mathbf{x}}_m\tilde{\mathbf{x}}_m^T} = \alpha\left\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right\|^2 + \left(\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)\tilde{\mathbf{x}}_m\right)^2 = \alpha\left\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma-1)}\right\|^2. \tag{20}$$

Из (20) получаем

$$\left\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right\| \le \left\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma-1)}\right\|. \tag{21}$$

Если неравенство

$$\left(\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)\tilde{\mathbf{x}}_m\right)^2 \ge \gamma\left\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right\|^2, \ \gamma > 0, \tag{22}$$

справедливо для члена $\left(\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)\tilde{\mathbf{x}}_m\right)^2$ в (20), то векторы $\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}$ сходятся в норме (21) со скоростью не хуже скорости сходимости геометрической прогрессии с декрементом $q = \sqrt{\alpha/(\alpha+\gamma)}$.

Если же, наоборот, для любого $\varepsilon > 0$, начиная с некоторой итерации σ, неравенство

$$\left(\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)\tilde{\mathbf{x}}_m\right)^2 < \varepsilon, \tag{23}$$

выполняется, то выполняется (24):

$$\varepsilon > \left(\left(\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right)\tilde{\mathbf{x}}_m\right)^2 \ge \left(\left|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\tilde{\mathbf{x}}_m\right| - \left|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)}\tilde{\mathbf{x}}_m\right|\right)^2 \ge 0. \tag{24}$$

Это означает, что проекции $\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\tilde{\mathbf{x}}_m$ слабо сходятся к прогнозы $\mathbf{z}_i\mathbf{x}_m$:

Стоит отметить, что полученная выше сходимость является слабой сходимостью (16) в области безусловной оптимизации. Если неравенство $\left\|\tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma+1)} - \tilde{\mathbf{z}}_i^{(\sigma)}\right\| < \varepsilon'$ выполняется для любого $\varepsilon' > 0$, то это означает сходимость (21).

Тогда справедливы следующие результаты:

а) Проекции $\mathbf{z}_i^{(\sigma)}\mathbf{x}_m$ в итеративном процессе (9) слабо сходятся к проекциям $\mathbf{z}_i\mathbf{x}_m$ решения задачи (4).

б) При определенных условиях векторы $\mathbf{z}_i^{(\sigma)}$ в итеративном процессе (9) сходятся к решению задачи (4).

Таким образом, доказательство завершено.

2. Численное моделирование. Предложенный метод был протестирован на моделях, параметры которых приведены в табл. 2. Реконструкция весов ориентированных взвешенных знаковых графов проводилась при ограничениях на узлы в заданном диапазоне изменения значений элементов их матрицы смежности.

Таблица 2

Параметры испытанных моделей.

Номер модели	Ссылки	Параметры тестовых моделей		ДФ, δ
1	2	3		4
	[16]	Имя: Enterprise Stability; Матрица 9x9 на 44 ребрах с кумулятивным весом по абсолютной величине 17,1		0.6
	[17]	Название: Клинический риск при приеме лекарств, матрица 17x17 на 83 гранях с кумулятивным весом в абсолютном значении 15,73		0.7
	[18]	Название: Финансовый кризис в Малайзии; матрица 24x24 на 41 ребрах с кумулятивным весом по абсолютному значению 41,0. $N^{(0)} \in R \mid [1,5,8,9,15,17,22]$		0,5
	[19]	Имя: Специалист по Ближнему Востоку; Матрица 62x62 на 99 ребрах с кумулятивным весом по абсолютному значению 99,0		0.3
	[20]	Название: Dutch PM; матрица 85x85 на 89 ребрах с кумулятивным весом по абсолютной величине 89,0. $N^{(0)} \in R \mid [49,62]$		0.25

Как показано в табл. 3, предложенный алгоритм восстановил веса матрицы смежности графа по заданным параметрам с приемлемыми коэффициентами подобия. Коэффициент подобия вычисляется как проекция результирующего вектора на исходный вектор.

Таблица 3

Результаты, полученные для тестовых моделей.

Номер тестовой модели	Коэффициент подобия для:		
	Вектора ответа	Вектора управления	Реконструированной матрицы
1	2	3	4
	0,999717	0,999328	1,010855
	0,999905	0,999830	0,980328
	0,998662	0,999746	0,945098
	0,998883	1.044929	0,949404
	0,999798	1.172636	0,946034

3. Обсуждение полученных результатов. Предложенный алгоритм оценивался по нескольким параметрам и критериям оценки:

Выполнимость. Возникающие в (4) задачи являются задачами квадратичного программирования с переменными ограничениями (в виде неравенств). По построению матрица задачи $\mathbf{x}_m\mathbf{x}_m^T$ является положительно полуопределенной. Поскольку ранг матрицы $\mathbf{x}_m\mathbf{x}_m^T$ равен единице, регуляризация Тихонова [14] преобразует матрицу в строго положительно определенную. Это обеспечивает однозначную решаемость задачи минимизации (4).

Точноть. Алгоритм является вычислительно эффективным с точностью $O\left(n^3 \cdot m \cdot l\right)$, где m – число условных собственных пар, используемых при решении задачи (4); l – число итераций. На тестовых примерах $l \sim O(l)$.

Сходимость. Поскольку допустимая область переменных ограничений с положительно определенной матрицей является выпуклой, то сходимость задачи квадратичного программирования (9) гарантирована. Высокая скорость сходимости достигается за счет использования методов множителей Лагранжа второго порядка [13] и метода Пауэлла [21] (или метод сопряженных направлений) используется для решения полученных систем линейных уравнений.

Время выполнения. Во всех исследованных примерах на одном ядре процессора Intel Pentium, CPU L7200 1,33 ГГц время выполнения не превышало 1 с (табл. 4). Такое время выполнения вполне приемлемо для принятия управленческих решений, не требующих сверхбыстрой реакции.

Таблица 4

Время работы алгоритма

Число моделей	Размерность матрицы	Время выполнения, мс
1	9×9	0 .0668
2	17×17	0,1079
3	24×24	0,1291
4	62×62	0,4656
5	85×85	0,7657

Параметр регуляризации . Существует пороговое значение параметра регуляризации, ниже которого может нарушаться сходимость для некоторых строк матрицы системы линейных уравнений (9). Во всех тестовых примерах параметр регуляризации $2\cdot10^5$ обеспечивает быструю мгновенную сходимость за 1-2 итерации.

Надежность результатов. Положительно-определенная матрица системы линейных уравнений (9) и выпуклость допустимой области переменных ограничений гарантируют существование единственного глобального минимального решения задачи (4).

Заключение. Одной из важнейших и нерешенных задач в теории графов является реконструкция топологии графов. При отсутствии временного ряда данных для графовой модели сложных систем с нестохастическими параметрами решение этой задачи становится значительно более сложным.

Из исходной матрицы смежности получаем условный спектр квадратичной матрицы, сформированной из передаточной функции модели управления. Модифицируя этот спектр, восстанавливаем веса графа из шаблона матрицы смежности в допустимых границах.

Предложенный алгоритм реконструкции учитывает важную особенность матрицы смежности графа – направление главного собственного вектора к целевой вершине (по отклику). Когда графы имеют одинаковую топологию, но разные веса на дугах, то их спектры образуют в пространстве решений некоторое множество нечетких коллинеарных векторов. Линии этих векторов расходятся в пространстве векторов из-за их направленности к разным вершинам.

Интегрируя спектр графа и эффективную модель управления в задачу комбинаторной оптимизации, мы показали, как добиться полной реконструкции весов графа с приемлемой точностью.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00029, https://rscf.ru/project/25-21-00029/ в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chu M.T., Golub G.H.* Inverse Eigenvalue Problems: Theory, Algorithms, and Applications. Oxford University Press, 2005.
2. *Tselykh A., Vasilev V., Tselykh L.* Assessment of influence productivity in cognitive models, *Artif. Intell. Rev*., 2020, 53, pp. 5383-5409. Available at: https://doi.org/10.1007/s10462-020-09823-8.
3. *Nicoletti S., Carletti T., Fanelli D., Battistelli G., Chisci L.* Generating directed networks with prescribed Laplacian spectra, *J. Phys. Complex*., 2021, 2, 015004. Available at: https://doi.org/10.1088/2632-072X/abbd35.
4. *Butterworth J., Dunne P.E*. Spectral Techniques in Argumentation Framework Analysis. In: 6th International Conf. on Computational Models of Argument (COMMA). Potsdam, Germany, 2016, pp. 9-16. Available at: https://doi.org/10.3233/978-1-61499-686-6-167.
5. *Shine A., Kempe D.* Generative Graph Models based on Laplacian Spectra?, *In: The World Wide Web Conference*. ACM, New York, NY, USA, 2019, pp. 1691-1701. Available at: https://doi.org/10.1145/3308558.3313631.
6. *Martinkus K., Loukas A., Perraudin N., Wattenhofer R.* Spectre: Spectral conditioning helps to overcome the expressivity limits of one-shot graph generators, *In: 39th International Conference on Machine Learning (ICML 2022),* 2022, pp. 15159-15179.
7. *Luo T., Mo Z., Pan S.J.* Fast Graph Generation via Spectral Diffusion, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell*., 2024, 46, pp. 3496-3508. Available at: https://doi.org/10.1109/TPAMI.2023.3344758.
8. *Pandey P.K., Badarla V.* Reconstruction of network topology using status-time-series data, *Phys. A Stat. Mech. its Appl*., 2018, 490, pp. 573-583. Available at: https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.08.091.
9. *Wang Z., Jiang W., Wu W., Wang S.* Reconstruction of complex network from time series data based on graph attention network and Gumbel Softmax, *Int. J. Mod. Phys. C,* 2023, 34, Available at: https://doi.org/10.1142/S0129183123500572.
10. *Zhang Z., Chen Y., Mi Y., Hu G*. Reconstruction of dynamic networks with time-delayed interactions in the presence of fast-varying noises, *Phys. Rev. E,* 2019, 99, 042311. Available at: https://doi.org/10.1103/PhysRevE.99.042311.
11. *Timme M.* Revealing Network Connectivity from Response Dynamics, *Phys. Rev. Lett*., 2007, 98, 224101. Available at: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.224101.
12. *Bertsekas D.P.* The Method of Multipliers for Equality Constrained Problems, *In: Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*. Elsevier, 1982, pp. 95-157. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-093480-5.50006-4.
13. *Bertsekas D.P.* Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods, *Athena Scientifi, Belmont*, MA, 1996.
14. *Tikhonov A., Arsenin V.* Solutions of Ill-Posed Problems. Wiley, New York, 1977.
15. Lancaster, P., Tismenetsky, M.: The theory of matrices: with applications. Academic Press, Orlando, Fla, USA (1985).
16. *Groumpos P.P.* Why Model Complex Dynamic Systems Using Fuzzy Cognitive Maps? Robot. Autom. Eng. J., 2017, 1. Available at: https://doi.org/10.19080/RAEJ.2017.01.555563.
17. *Mazzuto G., Stylios C., Ciarapica F.E., Bevilacqua M., Voula G*. Improved Decision-Making through a DEMATEL and Fuzzy Cognitive Maps-Based Framework, *Math. Probl. Eng*., 2022, pp. 1-14. Available at: https://doi.org/10.1155/2022/2749435.
18. *Kim D.-H*. Cognitive Maps of Policy Makers on Financial Crises of South Korea and Malaysia: A Comparative Study, *Int. Rev. Public Adm*., 2004, 9, pp. 31-38. Available at: https://doi.org/10.1080/12294659.2005.10805047.
19. *Bonham G.M., Shapiro M.* CHAPTER SIX. Explanation of the Unexpected: The Syrian Intervention in Jordan in 1970, *In: Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites*. Princeton University Press, 2015, pp. 113-141. Available at: https://doi.org/10.1515/9781400871957-009.
20. *van Esch F.A.W.J.* From belief to behaviour. Using cognitive maps to test ideational policy explanations, *In: 10th Conference of the ECPR Standing Group on the European Union*. ECPR Press, Rome, 2021.
21. *Powell M.J.D.* An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives, *Comput. J.,* 1964, 7, pp. 155.162. Available at: https://doi.org/10.1093/comjnl/7.2.155.

Целых Александр Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: ant@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185562047; кафедра ИАСБ; д.т.н.; зав. кафедрой.

Васильев Владислав Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: vsvasilev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185983647; кафедра ИАСБ; к.т.н.; доцент.

Целых Лариса Анатольевна – Южный федеральный университет; e-mail: l.tselykh58@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185562047; кафедра ИАСБ; к.э.н.; доцент.

Барковский Симон Антонович – Южный федеральный университет; e-mail: sbarkovskiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634393932; кафедра ИАСБ; старший преподаватель.

Tselykh Alexander Nikolayevich – Southern Federal University; e-mail: ant@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185562047; the department IASB; dr. of eng. sc.; head of department.

Vasilev Vladislav Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: vsvasilev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185983647; the department IASB; cand. of eng. sc.; associate professor.

Tselykh Larisa Anatolievna – Southern Federal University; e-mail: l.tselykh58@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79185562047; the department IASB; cand. of ec. sc.; associate professor.

Barkovskii Simon Antonovich – Southern Federal University; e-mail: sbarkovskiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634393932; the department IASB; senior lecturer.

Раздел III. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 621.3.049.774.2 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-174-181

Б.Г. Коноплев

ОСОБЕННОСТИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЦИФРОВЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ КМОП-ТЕХНОЛОГИЙ 90–20 НМ

С целью снижения потребляемой мощности и повышения энергетической эффективности в КМОП интегральных схемах используется подпороговый режим работы транзисторов. При этом напряжение питания снижается до уровня меньше пороговых напряжений МОП-транзисторов, резко уменьшаются токи транзисторов и падает быстродействие устройств. Однако, в ряде применений значительное снижение потребляемой мощности оказывается более важным, чем низкое быстродействие. Поэтому КМОП интегральные схемы в подпороговом режиме нашли применение там, где определяющим требованием является радикальное уменьшение потребляемой мощности. К настоящему времени в разной степени освоения фирмами в мире используются субмикронные КМОП-технологии с минимальными проектными размерами элементов от 500 до 3 нм, причем большая часть продукции приходится на КМОП СБИС уровня 90–20 нм. В работе проведен анализ особенностей характеристик низковольтных цифровых схем на основе КМОП-технологий уровня 90–20 нм с целью выработки рекомендаций по проектированию энергоэффективных устройств на их основе. Рассмотрена методика определения ключевых параметров предиктивных моделей МОП-транзистора в подпороговом режиме. Получены выражения характеристик КМОП-инвертора в подпороговой области. Анализ результатов расчетов показывает существенное ухудшение характеристик КМОП-элементов в подпороговом режиме при уменьшении минимальных проектных размеров менее 90 нм. Это объясняется тем, что при разработке конструкции и технологии изготовления СБИС уровня 90–20 нм все меры были направлены на снижение токов утечки закрытых транзисторов в надпороговом режиме с целью уменьшения статической составляющей потребляемой мощности. Для повышения характеристик КМОП-элементов в подпороговом режиме необходимо оптимизировать конструкцию и технологию с целью снижения величин подпорогового размаха, DIBL-коэффициента и увеличения характеристического тока. Результаты могут быть полезны для разработчиков энергоэффективной аппаратуры.

Низковольтные КМОП интегральные схемы; технологии 90–20 нм; предиктивные модели МОП-транзисторов; подпороговый режим.

B.G. Konoplev

FEATURES OF LOW-VOLTAGE DIGITAL CIRCUITS BASED ON CMOS TECHNOLOGIES 90–20 NM

To increase energy efficiency, CMOS integrated circuits use a subthreshold mode of operation. The supply voltage decreases to a level lower than the threshold voltages of the MOSFETs, currents decrease and performance decreases. However, often a reduction in power consumption is more important than low performance. Therefore, CMOS integrated circuits in the subthreshold mode have applications where a radical reduction in power consumption is a crucial requirement. Now firms have used technologies with minimum sizes from 500 to 3 nm, with most of the products being at the 90–20 nm. The paper analyzes low-voltage circuits based on technologies 90–20 nm to develop recommendations for the design of energy-efficient devices. A technique for determining the key parameters of predictive MOSFET models in the subthreshold mode is considered. Expressions of the characteristics of inverter in the subthreshold region are obtained. Analysis shows a significant deterioration in the characteristics of CMOS elements in the subthreshold mode with a decrease in the dimensions of less than 90 nm. It is explained that when

developing technology 90–20 nm, all measures were aimed at reducing leakage currents in the over threshold mode to reduce static power consumption. To improve the characteristics of CMOS elements in the subthreshold mode, it is necessary to optimize the design and technology to reduce the values of the subthreshold span, the DIBL coefficient and increase the characteristic current. The results may be useful for developers of energy-efficient equipment.

Low-voltage CMOS integrated circuits; 90–20 nm technologies; predictive MOSFET models; subthreshold mode.

Введение. С целью кардинального снижения потребляемой мощности и повышения энергетической эффективности в КМОП интегральных схемах используется подпороговый режим работы транзисторов [1, 2].

При этом напряжение питания таких низковольтных схем снижается до уровня меньше пороговых напряжений МОП-транзисторов, резко уменьшаются токи транзисторов и падает быстродействие устройств. Однако, в ряде применений значительное снижение потребляемой мощности оказывается более важным, чем низкое быстродействие. Поэтому КМОП интегральные схемы в подпороговом режиме нашли широкое применение в беспроводных устройствах радиочастотной идентификации (RFID), контроля доступа, систем логистики, в медицинских имплантантах, автономных сенсорных сетях «интернета вещей» (Internet of Things – IoT) и других миниатюрных устройствах, где определяющим требованием является радикальное уменьшение потребляемой мощности [3], особенно в случае собирания радиочастотной энергии из окружающей среды (Energy Harvesting – EH) для питания устройств [4, 5].

В низковольтных схемах могут применяться МОП-транзисторы типовой для данной технологии конструкции или специально спроектированные с учетом особенностей подпорогового режима работы [6].

К настоящему времени в разной степени освоения фирмами в мире используются субмикронные КМОП-технологии с минимальными проектными размерами элементов от 500 до 3 нм, причем большая часть продукции приходится на КМОП СБИС уровня 90–20 нм [7, 8].

Конструкции и технологии микросхем при уменьшении проектных норм изменялись с целью повышения характеристик элементов КМОП СБИС при номинальных напряжениях питания, при этом, как правило, не учитывались особенности их применения в низковольтных приложениях.

Целью исследования является анализ особенностей характеристик низковольтных цифровых схем на основе КМОП-технологий уровня 90–20 нм и выработка рекомендаций по проектированию и совершенствованию энергоэффективных устройств на их основе.

Особенности КМОП-технологий уровня 90–20 нм. Уровни промышленных технологий СБИС принято обозначать технологическими узлами TN (technology node) [8].

Субмикронные КМОП-технологии с минимальными проектными размерами элементов от 500 до 3 нм можно разделить на три группы (поколения), имеющих существенные различия. К первому поколению [7] можно отнести TN 500 нм, 350 нм, 250 нм, 180 нм, 130 нм; ко второму поколению – TN 90 нм [9], 65 нм [10], 45 нм [11], 32 нм [12], 20 нм [13]; к третьему поколению [8, 14] – TN 14 нм, 10 нм, 7 нм, 5 нм, 3 нм.

В субмикронных КМОП СБИС первого поколения использовались планарные (2D) полевые транзисторы с затворами из поликристаллического кремния (poly-Si) и подзатворным диэлектриком из SiO_2. Повышение степени интеграции и быстродействия СБИС при движении от TN 500 нм до TN 130 нм достигалось за счет уменьшения размеров и паразитных емкостей элементов и соединительных проводников. При этом конструкция МОП-транзисторов принципиально не изменялась [7]. Для КМОП СБИС первого поколения применимы правила масштабирования с обеспечением постоянной напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике [15].

Важнейшим параметром цифровых схем является отношение тока стока открытого транзистора I_{don} (при $V_{ds}=V_{gs}=V_{dd}$, где V_{ds} - напряжение сток-исток, V_{gs} – напряжение затвор-исток, V_{dd} – напряжение источника питания) к току закрытого транзистора I_{doff} (при $V_{ds}=V_{dd}$, $V_{gs}=0$). При уменьшении длины канала увеличивается влияние на характеристики транзистора короткоканальных эффектов, приводящих к уменьшению отношения I_{on}/I_{off} [7].

Субмикронные СБИС второго поколения также строятся на планарных полевых транзисторах, но с целью предотвращения деградации отношения I_{don}/I_{doff}, начиная с TN 90 нм, структуры и технологии формирования транзисторов существенно изменялись при движении от TN 90 нм к TN 20 нм [7, 9, 13].

В субмикронных СБИС третьего поколения с целью дальнейшего снижения влияния короткоканальных эффектов на отношение I_{don}/I_{doff} применяются непланарные (3D) полевые транзисторы: FINFET (fin, с затвором в виде плавника, окружающим канал с трех сторон), GAA (gate-all- around, с затвором, окружающем канал со всех четырех сторон), MCB (multi-bridge-channel, с многими каналами, окруженными затвором со всех сторон) [8, 14].

В табл. 1 сведены ключевые инновации для субмикронных СБИС второго поколения.

Таблица 1

Инновации для субмикронных СБИС второго поколения

TN	Материал затвора	Материал подзатворного диэлектрика	Ключевые инновации
90 нм	poly-Si	SiO_2	Напряженный кремний [7, 9]
65 нм	poly-Si	SiON	Подзатворный диэлектрик из оксинитрида кремния SiOxNy [10]
45 нм	Metal	High K	Затвор из никель-силицида NiSi или титан-нитрида TiN [11]. Подзатворный диэлектрик из оксида гафния HfO_2 [11]
32 нм	Metal	High K	Подзатворный диэлектрик из оксинитрида гафния HfSiON [12]
20 нм	Metal	High K	Затвор из алюминия Al и титан-нитрида TiN [13]

В субмикронных СБИС второго поколения с целью увеличения I_{don}, начиная с TN 90 нм, применяются технологии напряженного кремния [9–13]. Сток-истоковые области p-МОП-транзисторов формируются на основе кремний-германия SiGe, кристаллическая решетка которого отличается от решетки кремния в канале. Возникающие за счет этого сжимающие механические напряжения несколько сближают атомы кремния в канале, повышая скорость, подвижность дырок и ток I_{don}. Для создания растягивающих механических напряжений в каналах n-МОП-транзисторов над затворами формируются «шапочки» из нитрида кремния Si_3N_4, при этом расстояния между атомами в канале увеличиваются, повышая скорость, подвижность электронов и ток I_{don} [9–12].

Другим способом увеличения отношения I_{don}/I_{doff} является снижение токов утечки закрытого транзистора I_{doff} [16]. Для этого следует увеличивать толщину подзатворного окисла T_{ox}, что при сохранении на прежнем уровне порогового напряжения V_{th} требует, начиная с TN 65 нм, применения подзатворного диэлектрика с более высокой диэлектрической проницаемостью (High K): оксинитрида кремния SiOxNy [10], оксида гафния HfO_2 [11], оксинитрида гафния HfSiON [12].

С целью снижения порогового напряжения, сопротивления проводников затворов и повышения подвижности носителей заряда в канале для TN 45 нм, TN 32 нм затворы транзисторов формируются из металлических никель-силицида NiSi или титан-нитрида TiN [11, 12], а для TN 20 - из алюминия Al и титан-нитрида TiN [13].

С учетом существенных различий структуры и технологии КМОП СБИС второго поколения при движении от TN 90 нм к TN 20 нм для моделирования уже нельзя применять правила масштабирования с обеспечением постоянной напряженности электрического поля в подзатворном диэлектрике [15, 17]. Удовлетворительные результаты для прогнозирования характеристик КМОП СБИС в этом случае дает использование предиктивных технологических моделей PTM (Predictive Technology Model), предложенных в [18–21] и основанных на весьма точной модели МОП-транзистора BSIM [22, 23].

Компактная предиктивная модель МОП-транзистора в подпороговом режиме. В подпороговом режиме ток стока МОП-транзистора определяется выражением [21]:

$$I_d = I_0 \cdot W \cdot \left(1 - exp\left(\frac{-V_{ds}}{\varphi_T}\right)\right) \cdot exp\left(\frac{\left(V_{gs} + \eta \cdot V_{ds}\right) \cdot \ln 10}{S}\right), \quad (1)$$

где I_0 – характеристический ток на единицу ширины канала; W – ширина канала; φ_T – температурный потенциал; η – DIBL-коэффициент (DIBL – Drain-Induced Barrier Lowering, отражает степень уменьшения V_{th} при увеличении V_{ds}); S – подпороговый размах ($S = \varphi_T \cdot n \cdot \ln 10$, где n – коэффициент наклона вольтамперной характеристики).

В соответствии с выражением (1) удельный ток стока ($I_{d0} = I_d/W$) при заданной температуре определяется только тремя параметрами, характерными для рассматриваемого TN: I_0, η, S. Эти параметры можно определить экспериментально или вычислить для каждого TN, используя модель BSIM [23].

В табл. 2 приведены типовые значения параметров МОП-транзисторов второго поколения от TN 90 нм до TN 32 нм в подпороговом режиме [21].

Таблица 2

Параметры МОП-транзисторов в подпороговом режиме [21]

TN, нм	S, мВ/декада	η, мВ/В	I_0, нА/мкм
90	86.1	100	5.1
65	88.2	123	4.6
45	94.4	171	3.7
32	99.9	236	3.2

В табл. 2 отсутствуют данные для TN 20 нм, кроме того, для различных фирм конкретные значения технологических узлов могут отличаться от приведенных в табл. 2. Чтобы определить параметры моделей для любых значений TN, можно применить метод наименьших квадратов, основываясь на известных данных для других TN в пределах рассматриваемого поколения КМОП СБИС. Для вычисления неизвестных коэффициентов в формулах, описывающих зависимости параметров предиктивных моделей от значений TN, удобно в методе наименьших квадратов для решения систем алгебраических уравнений применить программу Mathcad.

Полученные по методу наименьших квадратов на основе данных табл. 2 выражения для параметров S_m, η_m, I_{0m} предиктивных моделей имеют вид (размерности соответствуют табл. 2):

$$S_m = 120.71 - 0.793 \cdot (TN) + 4.529 \cdot 10^{-3} \cdot (TN)^2, \quad (2)$$

$$\eta_m = 442.213 - 8.028 \cdot (TN) + 0.047 \cdot (TN)^2, \quad (3)$$

$$I_{0m} = 1.15 + 0.073 \cdot (TN) - 3.228 \cdot 10^{-4} \cdot (TN)^2. \quad (4)$$

В табл. 3 приведены результаты расчетов по формулам (2–4).

Таблица 3

Параметры предиктивных моделей МОП-транзисторов

TN, нм	S_m, мВ/декада	η_m, мВ/В	I_{0m}, нА/мкм
90	86.03	100.39	5.11
65	88.30	118.97	4.53
45	94.20	176.13	3.78
32	99.97	233.45	3.16
20	106.66	300.39	2.48

Погрешности параметров моделей относительно известных начальных данных не превышают 3.3%.

Цифровые КМОП-элементы в подпороговой области. Из выражения (1) можно получить формулу для оценки отношения I_{don}/I_{doff}, важной характеристики электронного ключа:

$$I_{don}/I_{doff} = exp(2.3 \cdot V_{dd}/S) = exp(V_{dd}/(n \cdot \varphi_T)). \quad (5)$$

Из (5) видно, что отношение I_{don}/I_{doff} уменьшается при снижении V_{dd} и при увеличении S, а также при возрастании температуры.

Для анализа помехоустойчивости логических элементов из (1) можно аналогично [17] получить выражение для передаточной характеристики КМОП-инвертора, приравняв токи стока n-канального I_{dn} и p-канального I_{dp} транзисторов при $V_{gsn} = V_{in}$, $V_{gsp} = V_{in} - V_{dd}$, $V_{dsn} = V_{out}$, $V_{dsp} = V_{out} - V_{dd}$, в следующем виде:

$$V_{in} = \frac{S_n \cdot S_p}{2.3 \cdot (S_n + S_p)} \cdot \ln \frac{I_{0p} \cdot W_p \cdot \left(1 - exp\left(\frac{V_{out} - V_{dd}}{\varphi_T}\right)\right)}{I_{0n} \cdot W_n \cdot \left(1 - exp\left(\frac{-V_{out}}{\varphi_T}\right)\right)} +$$

$$+ \frac{S_n \cdot \left(V_{dd} + \eta_p \cdot (V_{dd} - V_{out})\right) - S_p \cdot \eta_n \cdot V_{out}}{S_n + S_p}, \quad (6)$$

где V_{in}, V_{out} – входное и выходное напряжение инвертора, соответственно; подстрочные значки n или p определяют принадлежность параметров к n- или p-канальному транзистору, соответственно.

В подпороговой области задержку сигнала в логическом элементе t_p и потребляемую им динамическую P_{dyn} мощность можно оценить по формулам [2, 21]:

$$t_p = \frac{C_{sub} \cdot W \cdot V_{dd}}{I_{don}}, \quad (7)$$

$$P_{dyn} = \alpha \cdot C_{sub} \cdot W \cdot V_{dd}^2 \cdot f_{clk}, \quad (8)$$

где C_{sub} – общая емкость логического элемента на единицу ширины канала в подпороговой области; α – коэффициент активности ($\alpha \leq 1$); f_{clk} – тактовая частота.

В табл. 4 приведены типовые значения C_{sub} для инвертора с нагрузочной способностью, равной четырем (FO4) [21].

Таблица 4

Значения общей емкости инвертора с FO4

C_{sub}, фФ/мкм	TN, нм				
	20	32	45	65	90
из [21]	-	14.4	15.9	17.5	18.7
расчет (9)	12.84	14.42	15.86	17.53	18.69

Полученное по методу наименьших квадратов на основе данных [21] выражение для параметра C_{subm} предиктивной модели имеет вид (размерности соответствуют табл. 4):

$$C_{subm} = 9.693 + 0.174 \cdot (TN) - 8.227 \cdot 10^{-4} \cdot (TN)^2. \quad (9)$$

Результаты расчетов по формуле (9) для TN 20–90 нм также приведены в табл. 4. Погрешности параметров моделей относительно известных начальных данных не превышают 0.3%.

Выражения (1, 5–8) можно использовать для прогностических оценок характеристик цифровых КМОП-элементов в подпороговой области. Описанная методика позволяет определять параметры предиктивных технологических моделей PTM для любых технологических узлов TN при совершенствовании технологий в рамках рассматриваемого поколения: см. табл. 2–4 и формулы (2–4, 9).

На рис. 1, 2 в качестве примера использования рассмотренной методики представлены результаты расчетов некоторых характеристик инвертора в подпороговой области для различных TN.

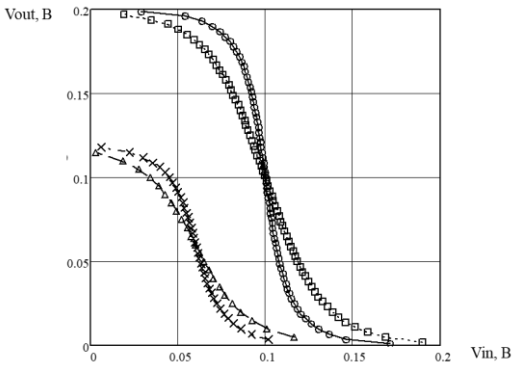


Рис. 1. Передаточные характеристики инвертора при $V_{dd} = 0.2$ В (○ – TN=90 нм, □ – TN=20 нм) и $V_{dd} = 0.12$ В (×– TN=90 нм, Δ – TN=20 нм)

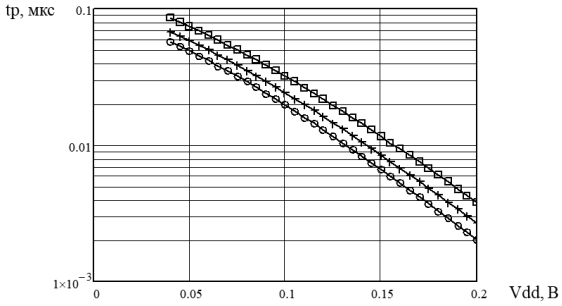


Рис. 2. Зависимости задержки сигнала в инверторе от напряжения питания V_{dd} для различных значений TN: ○ – TN=90 нм, + – TN=45 нм, □ – TN=20 нм

По результатам анализа полученных характеристик можно определить основные параметры низковольтных цифровых схем: логические уровни, запасы помехоустойчивости, время задержки, статическую и динамическую потребляемую мощность и др. Результаты расчетов (см. рис. 1, 2) свидетельствуют о существенной деградации основных параметров цифровых КМОП-элементов в подпороговой области при уменьшении проектной нормы. Анализ результатов расчетов и формул (1, 5–8) показывает, что для совершенствования КМОП-элементов в подпороговом режиме необходимо оптимизировать конструкцию и технологию с целью снижения величин S, η и увеличения характеристического тока I_0.

Заключение. В работе проведен анализ особенностей характеристик низковольтных цифровых схем на основе КМОП-технологий уровня 90–20 нм с целью выработки рекомендаций по проектированию и совершенствованию энергоэффективных устройств на их основе.

Рассмотрена методика определения ключевых параметров предиктивных моделей МОП-транзистора в подпороговом режиме. Получены выражения характеристик КМОП-инвертора в подпороговой области.

Анализ результатов расчетов показывает существенное ухудшение характеристик КМОП-элементов в подпороговом режиме при уменьшении минимальных проектных размеров менее 90 нм. Это объясняется тем, что при разработке конструкции и технологии изготовления СБИС уровня 90–20 нм все меры были направлены на снижение токов утечки закрытых транзисторов в надпороговом режиме с целью уменьшения статической составляющей потребляемой мощности. Для повышения характеристик КМОП-элементов в подпороговом режиме необходимо оптимизировать конструкцию и технологию с целью снижения величин S, η и увеличения характеристического тока I_0.

Результаты могут быть полезны для разработчиков энергоэффективной аппаратуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Wang A., Calhoun B. H., Chandrakasan A. P.* Sub-threshold Voltage Circuit Design for Ultra Low Power Systems. – New York: Springer, 2006. – 209 p.
2. *Reynders N., Dehaene W.* Ultra-Low-Voltage Design of Energy-Efficient Digital Circuits. – New York: Springer, 2015. – 192 p.
3. *Jiann-Shiun Yuan, Jie Lin, Qutaiba Alasad, Shayan Taheri.* Ultra-Low-Power Design and Hardware Security Using Emerging Technologies for Internet of Things // Electronics. – 2017. – Vol. 6, No. 3, 67. – 55 p.
4. *Ibrahim H.H., Singh M.J., Al-Bawri S.S., Ibrahim S.K., Islam M.T., Alzamil A., Islam M.S.* Radio Frequency Energy Harvesting Technologies: A Comprehensive Review on Designing, Methodologies, and Potential Applications // Sensors. – 2022. – Vol. 22, 4144. – 30 p.
5. *Коноплев Б.Г.* Модель ректенны на основе МОП-транзисторов для собирания СВЧ энергии при сверхнизких уровнях мощности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 6 (242). – С. 248-256.
6. *Vaddi R., Dasgupta S., Agarwal R.P.* Device and Circuit Design Challenges in the Digital Subthreshold Region for Ultralow-Power App // Hindawi VLSI Design. – 2009. – Vol. 9, 283702. – 14 p.
7. *Sicard E., Bendhia S.D.* Advanced CMOS Cell Design. – New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2007. – 364 p.
8. International Roadmap for Devices and Systems. More Moore White Paper. – IEEE, 2023. – 37 p.
9. *Sicard E.* Introducing 90 nm technology in Microwind3 // HAL Open Science. – URL: https://hal.science/hal-03324305 (дата обращения: 16.05.2025).
10. *Sicard E., Aziz S.M.* Introducing 65 nm technology in Microwind3 // HAL Open Science. – URL: https://hal.science/hal-03324309 (дата обращения: 16.05.2025).
11. *Sicard E., Aziz S.M.* Introducing 45 nm technology in Microwind3 // HAL Open Science. – URL: https://hal.science/hal-03324315 (дата обращения: 16.05.2025).
12. *Sicard E., Aziz S.M.* Introducing 32 nm technology in Microwind35 // HAL Open Science. – URL: https://hal.science/hal-03324299 (дата обращения: 16.05.2025).
13. *Sicard E.* Introducing 20 nm technology in Microwind // HAL Open Science. – URL: https://hal.science/hal-03324322 (дата обращения: 16.05.2025).
14. *Sicard E., Trojman L.* Introducing 3-nm Nano-Sheet FET technology in Microwind // HAL Open Science. – URL: https://hal.science/hal-03377556 (дата обращения: 16.05.2025).
15. *Bol D., Ambroise R., Flandre D., Legat J.-D.* Interests and Limitations of Technology Scaling for Subthreshold Logic // IEEE Transactions on very large scale integration (VLSI) systems. – 2009. – Vol. 17, No. 10. – P. 1508-1519.
16. *Roy K., Mukhopadhyay S., Mahmoodi-Meimand H.* Leakage Current Mechanisms and Leakage Reduction Techniques in Deep-Submicrometer CMOS Circuits // Proceedings of the IEEE. – 2003. – Vol. 91, No. 2. – P. 305-327.
17. *Hanson S., Seok M., Sylvester D., Blaauw D.* Nanometer Device Scaling in Subthreshold Logic and SRAM // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2008. – Vol. 55, No. 1. – P. 175-185.
18. *Cao Y., Sato T., Orshansky M., Sylvester D., Hu C.* New Paradigm of Predictive MOSFET and Interconnect Modeling for Early Circuit Simulation // IEEE 2000 Custom Integrated Circuits Conference. – IEEE, 2000. – P. 201-204.
19. *Zhao W., Cao Y.* Predictive technology model for nano-CMOS design exploration // ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst. – 2007. – Vol. 3, No. 1. Article 1. – 17 p.
20. *Zhao W., Cao Y.* New Generation of Predictive Technology Model for Sub-45 nm Early Design Exploration // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2006. – Vol. 53, No. 11. – P. 2816-2823.
21. *Bol D., Ambroise R., Flandre D., Legat J.-D.* Impact of Technology Scaling on Digital Subthreshold Circuits // IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. – IEEE, 2008. – P. 179-184.
22. *Sheu B. J., Scharfetter D. L., Ko P.-K., JENG M.-C.* BSIM: Berkeley Short-Channel IGFET Model for MOS Transistors // IEEE J. of Solid-State Circuits. – 1987. – Vol. SC-22, No. 4. – P. 558-566.
23. *Hu C., Niknejad A.M., Chauhan S.Y.* BSIM4v4.8.2 MOSFET Model – User's Manual. – USA, CA, Berkeley: University of California, 2020. – 176 p.

REFERENCES

1. *Wang A., Calhoun B. H., Chandrakasan A. P.* Sub-threshold Voltage Circuit Design for Ultra Low Power Systems. New York: Springer, 2006, 209 p.
2. *Reynders N., Dehaene W.* Ultra-Low-Voltage Design of Energy-Efficient Digital Circuits. New York: Springer, 2015, 192 p.
3. *Jiann-Shiun Yuan, Jie Lin, Qutaiba Alasad, Shayan Taheri.* Ultra-Low-Power Design and Hardware Security Using Emerging Technologies for Internet of Things, *Electronics,* 2017, Vol. 6, No. 3, 67, 55 p.
4. *Ibrahim H.H., Singh M.J., Al-Bawri S.S., Ibrahim S.K., Islam M.T., Alzamil A., Islam M.S.* Radio Frequency Energy Harvesting Technologies: A Comprehensive Review on Designing, Methodologies, and Potential Applications, *Sensors,* 2022, Vol. 22, 4144, 30 p.

5. *Konoplev B.G.* Model' rektenny na osnove MOP-tranzistorov dlya sobiraniya SVCH energii pri sverkhnizkikh urovnyakh moshchnosti [A rectenna model based on MOSFETS for microwave energy harvesting at ultra-low power levels], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 6 (242), pp. 248-256.
6. *Vaddi R., Dasgupta S., Agarwal R.P.* Device and Circuit Design Challenges in the Digital Subthreshold Region for Ultralow-Power App, *Hindawi VLSI Design,* 2009, Vol. 9, 283702, 14 p.
7. *Sicard E., Bendhia S.D.* Advanced CMOS Cell Design. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2007, 364 p.
8. International Roadmap for Devices and Systems. More Moore White Paper. IEEE, 2023, 37 p.
9. *Sicard E.* Introducing 90 nm technology in Microwind3, *HAL Open Science*. Available at: https://hal.science/hal-03324305 (accessed 16 May 2025).
10. *Sicard E., Aziz S.M.* Introducing 65 nm technology in Microwind3, *HAL Open Science*. Available at: https://hal.science/hal-03324309 (accessed 16 May 2025).
11. *Sicard E., Aziz S.M.* Introducing 45 nm technology in Microwind3, *HAL Open Science*. Available at: https://hal.science/hal-03324315 (accessed 16 May 2025).
12. *Sicard E., Aziz S.M.* Introducing 32 nm technology in Microwind35, *HAL Open Science*. Available at: https://hal.science/hal-03324299 (accessed 16 May 2025).
13. *Sicard E.* Introducing 20 nm technology in Microwind, *HAL Open Science*. Available at: https://hal.science/hal-03324322 (accessed 16 May 2025).
14. *Sicard E., Trojman L.* Introducing 3-nm Nano-Sheet FET technology in Microwind, *HAL Open Science*. – URL: https://hal.science/hal-03377556 (accessed 16 May 2025).
15. *Bol D., Ambroise R., Flandre D., Legat J.-D.* Interests and Limitations of Technology Scaling for Subthreshold Logic, *IEEE Transactions on very large scale integration (VLSI) systems,* 2009, Vol. 17, No. 10, pp. 1508-1519.
16. *Roy K., Mukhopadhyay S., Mahmoodi-Meimand H.* Leakage Current Mechanisms and Leakage Reduction Techniques in Deep-Submicrometer CMOS Circuits, *Proceedings of the IEEE,* 2003, Vol. 91, No. 2, pp. 305-327.
17. *Hanson S., Seok M., Sylvester D., Blaauw D.* Nanometer Device Scaling in Subthreshold Logic and SRAM, *IEEE Transactions on Electron Devices,* 2008, Vol. 55, No. 1, pp. 175-185.
18. *Cao Y., Sato T., Orshansky M., Sylvester D., Hu C.* New Paradigm of Predictive MOSFET and Interconnect Modeling for Early Circuit Simulation, *IEEE 2000 Custom Integrated Circuits Conference,* IEEE, 2000, pp. 201-204.
19. *Zhao W., Cao Y.* Predictive technology model for nano-CMOS design exploration, *ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst.*, 2007, Vol. 3, No. 1. Article 1, 17 p.
20. *Zhao W., Cao Y.* New Generation of Predictive Technology Model for Sub-45 nm Early Design Exploration, *IEEE Transactions on Electron Devices,* 2006, Vol. 53, No. 11, pp. 2816-2823.
21. *Bol D., Ambroise R., Flandre D., Legat J.-D.* Impact of Technology Scaling on Digital Subthreshold Circuits, *IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI*. IEEE, 2008, pp. 179-184.
22. *Sheu B. J., Scharfetter D. L., Ko P.-K., JENG M.-C.* BSIM: Berkeley Short-Channel IGFET Model for MOS Transistors, *IEEE J. of Solid-State Circuits,* 1987, Vol. SC-22, No. 4, pp. 558-566.
23. *Hu C., Niknejad A.M., Chauhan S.Y.* BSIM4v4.8.2 MOSFET Model – User's Manual. USA, CA, Berkeley: University of California, 2020, 176 p.

Коноплев Борис Георгиевич – Южный федеральный университет; e-mail: kbg@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; д.т.н.; профессор; научный руководитель Института нанотехнологий, электроники и приборостроения.

Konoplev Boris Georgievich – Southern Federal University; e-mail: kbg@sfedu.ru; Taganrog, Russia; dr. of eng. sc.; professor; scientific advisor, Institute of Nanotechnologies, Electronics, and Equipment Engineering.

УДК 681.5.015.3 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-182-188

О.В. Афанасьева, Т.Ф. Туляков

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАДИЦИОННЫХ И СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МОНИТОРИНГА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Проводится всесторонний анализ эффективности традиционных и современных технологий мониторинга линий электропередач (ЛЭП). Линии электропередач являются критически важным элементом энергетической инфраструктуры, и их надежная эксплуатация напрямую влияет на экономическую стабильность и безопасность. Традиционные методы мониторинга, такие как визуальные осмотры и механические устройства, долгое время оставались основными инструментами контроля, однако их ограниченная точность, высокая зависимость от человеческого фактора и невозможность оперативного выявления скрытых дефектов делают их менее эффективными в условиях возрастающих нагрузок на энергосистемы. Современные технологии, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА), интернет вещей (IoT), автоматизированные системы мониторинга и цифровые двойники, предлагают принципиально новые возможности для контроля состояния ЛЭП. Они обеспечивают высокую точность диагностики, непрерывный сбор данных в реальном времени, снижение эксплуатационных затрат и повышение безопасности персонала. В статье представлена классификация как традиционных, так и современных методов, а также проведен их сравнительный анализ по ключевым параметрам: точность, скорость реагирования, стоимость, безопасность и влияние на эксплуатацию. Результаты исследования демонстрируют, что современные технологии превосходят традиционные подходы по всем рассмотренным критериям. В частности, использование IoT и БПЛА позволяет минимизировать человеческий фактор, сократить время инспекций и повысить детализацию данных. Системы цифровых двойников дают возможность прогнозировать возможные аварии и оптимизировать плановое обслуживание. Однако успешное внедрение инновационных решений требует дополнительных инвестиций, обучения персонала и интеграции с существующими системами управления. В заключении делается вывод о стратегической важности перехода на современные технологии мониторинга ЛЭП для повышения надежности и устойчивости энергетической инфраструктуры. Несмотря на высокие первоначальные затраты, их долгосрочные преимущества, включая снижение аварийности, экономию ресурсов и повышение безопасности, полностью оправдывают инвестиции. Авторы подчеркивают необходимость дальнейшего развития цифровых технологий в энергетике для обеспечения стабильного и эффективного функционирования электросетей.

Линии электропередач; мониторинг; современные технологии; беспилотные летательные аппараты; анализ эффективности; безопасность; надежность.

O.V. Afanaseva, T.F. Tulyakov

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF TRADITIONAL AND MODERN TECHNOLOGIES FOR MONITORING POWER TRANSMISSION LINES

The article provides a comprehensive analysis of the effectiveness of traditional and modern technologies for monitoring power transmission lines (PTL). Power transmission lines are a critical element of the energy infrastructure, and their reliable operation directly affects economic stability and safety. Traditional monitoring methods, such as visual inspections and mechanical devices, have long remained the main control tools, but their limited accuracy, high dependence on the human factor and the inability to promptly detect hidden defects make them less effective in the face of increasing loads on power systems. Modern technologies, including unmanned aerial vehicles (UAVs), the Internet of Things (IoT), automated monitoring systems and digital twins, offer fundamentally new opportunities for monitoring the condition of PTLs. They provide high diagnostic accuracy, continuous data collection in real time, reduced operating costs and increased personnel safety. The article presents a classification of both traditional and modern methods, as well as a comparative analysis of their key parameters: accuracy, response speed, cost, safety and impact on operation. The results of the study demonstrate that modern technologies outperform traditional approaches in all the criteria considered. In particular, the use of IoT and UAVs allows minimizing the human factor, reducing inspection time and increasing data detail. Digital twin systems make it possible to predict possible accidents and optimize scheduled maintenance. However, successful implementation of innovative solutions requires additional investment, personnel training and integration with existing management systems. The conclusion is made about the strategic importance of switching to modern power transmission line monitoring technolo-

gies to improve the reliability and sustainability of the energy infrastructure. Despite high initial costs, their long-term benefits, including reduced accidents, resource savings and increased safety, fully justify the investment. The authors emphasize the need for further development of digital technologies in the energy sector to ensure stable and efficient operation of power grids.

Power lines; monitoring; modern technologies; unmanned aerial vehicles; efficiency analysis; safety; reliability.

Введение. Мониторинг линий электропередач играет ключевую роль в обеспечении надежности и безопасности энергетической инфраструктуры страны. Линии электропередач являются основными элементами, по которым электрическая энергия передается от генераторов к потребителям. Их стабильная работа критически важна для функционирования экономики и повседневной жизни, так как любые сбои могут привести к серьезным последствиям, включая экономические потери и даже угрозу жизни людей [1].

Традиционные методы мониторинга (визуальные осмотры, использование механических устройств) долгое время служили основой для мониторинга состояния линий электропередач. Однако с увеличением нагрузки на сети электропередач и усложнением инфраструктуры возникла необходимость в более эффективных и надежных способах контроля [2, 3]. Современные технологии (дроны, использование интернет вещей и др.) предлагают новые возможности для мониторинга и управления состоянием линий электропередач.

Целью данной работы является проведение всестороннего анализа эффективности традиционных и современных технологий мониторинга линий электропередач. Данный анализ поможет энергетическим компаниям и специалистам в области электроэнергетики лучше понять текущие тренды и сделать обоснованный выбор технологий для повышения надежности систем электроэнергии.

Традиционные технологии мониторинга. Традиционные технологии мониторинга линий электропередач (рис. 1) включают в себя методы и подходы, которые использовались на протяжении многих лет в процессе технического осмотра линий электропередач. Эти методы обеспечивают базовый уровень контроля и оценки состояния электрических линий [4, 5].

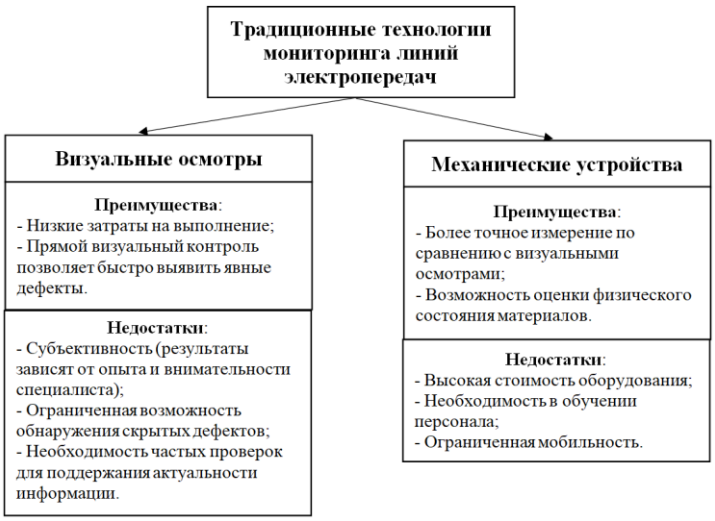


Рис. 1. Классификация традиционных технологий мониторинга линий электропередач

На данный момент выделяют два основных средства и метода, которые входят в традиционные технологии мониторинга линий: визуальные осмотры и механические устройства.

Визуальные осмотры – один из самых старых и простых методов мониторинга состояния линий электропередач [6]. Они проводятся квалифицированными специалистами, которые проверяют состояние проводов, опор, изоляторов и других компонентов

энергетической системы. В свою очередь к механическим устройствам относятся различные инструменты и аппараты, такие как динамометры и т.д., которые используются для проверки состояния проводов.

Хоть и традиционные методы обеспечивают базовые уровни контроля и диагностики, их недостаточная эффективность для обнаружения скрытых дефектов и необходимость регулярных проверок могут стать серьезными ограничениями [7, 8]. С учетом роста нагрузки на электрические сети и увеличения требований к надежности, возникает необходимость в более современных методах мониторинга, которые могут дополнить или заменить эти традиционные подходы.

Современные технологии мониторинга линий электропередач. Современные технологии для оценки технического состояния линий электропередач (рис. 2) значительно развились благодаря внедрению новых технологий, таких как применение интернет вещей, беспилотные летательные аппараты, системы автоматизации, а также разработка цифровых двойников. Эти методы обеспечивают более высокий уровень контроля, диагностики и предсказания состояния линий электропередач [9].

IoT включает в себя использование сенсоров и устройств, подключенных к интернету, для сбора и передачи данных о состоянии линий электропередач в реальном времени, что позволяет снизить влияние человека к нулю [10].

Беспилотные летательные аппараты оснащены камерами и сенсорами, которые позволяют проводить инспекции линий с воздуха, что значительно сокращает время и затраты на осмотр [11, 12].

Рис. 2. Классификация современных технологий мониторинга линий электропередач

Системы автоматизированного мониторинга используют комбинацию сенсоров, программного обеспечения и аналитических инструментов для автоматического сбора и анализа данных о техническом состоянии линий электропередач.

Цифровые двойники представляют собой виртуальные модели реальных линий электропередач, которые позволяют проводить симуляции и анализировать поведение линий в различных условиях, что может привести к уменьшению количества неисправностей, возникающих в ходе эксплуатации линий.

Современные технологии мониторинга линий электропередач предлагают более эффективные и надежные решения по сравнению с традиционными методами [13, 14]. Они обеспечивают возможность раннего выявления проблем, оптимизации процессов эксплуатации и снижения затрат на обслуживание.

Сравнительный анализ. Для анализа эффективности применения традиционных и современных средств мониторинга линий электропередач следует рассмотреть следующие параметры оценки: точность мониторинга, скорость, стоимость, безопасность и влияние на эксплуатацию [15].

С точки зрения точности мониторинга традиционные технологии сильно взаимосвязаны с человеческим фактором и не всегда позволяют выявить мелкие дефекты, в свою очередь современные технологии значительно могут повысить точность мониторинга, т.к. данные методы и устройства могут обнаружить возможные неисправности до их возникновения.

Если рассматривать процесс технического осмотра линий электропередач по параметры скорость реагирования, то получаем, что использование традиционных методов может быть малоэффективным, т.к. не всегда есть возможность физического доступа для решения проблемы, а современные технологии обеспечивают оперативны и быстрый доступ к данным в реальном времени, что позволяет значительно увеличить производительность в процессе технического осмотра линий [16].

Стоимость, как параметр для сравнения традиционных и современных методов технологий линий электропередач, позволяет сделать вывод, что хоть и традиционные методы на первоначальном этапе являются менее затратными, но они могут привести к более высоким затратам в будущем из-за запоздалого выявления проблем [17, 18].

Безопасность является одним из ключевых факторов при сравнении методов и средств для технического осмотра, т. к. использование традиционных технологий может представлять опасность для специалистов, особенно при осмотре высоковольтных линий электропередач, в свою очередь новые технологии позволяют проводить осмотр линий без непосредственного контакта специалиста с линиями электропередач [19, 20].

Для долгосрочной перспективы можно выделить параметр – влияние на эксплуатацию, он показывает, что традиционные методы технического осмотра могут приводить к непредсказуемым поломкам и авариям из-за недостатка информации или из-за некорректно интерпретированной информации ответственным специалистом, в свою очередь современные технологии и методы позволяют более точно планировать техническое обслуживание линий [21, 22].

Обсуждение. Анализ технологий показывает, что современные методы мониторинга линий электропередач значительно превосходят традиционные методы по всем ключевым параметрам [23, 24]. Однако для успешного внедрения новых технологий необходимо учитывать несколько факторов: необходимость подготовки и обучения специалистов работы с современными системами мониторинга линий электропередач, а также корректное внедрение уже в существующие процессы и системы.

Таким образом, переход к современным технологиям мониторинга линий электропередач является стратегически важным шагом для повышения надежности и безопасности энергетической инфраструктуры страны. Инвестиции в новые технологии не только оправдают себя в долгосрочной перспективе, но и помогут обеспечить устойчивое развитие [25].

Выводы. В целом, переход к современным технологиям мониторинга линий электропередач является необходимым шагом для повышения эффективности, безопасности и надежности энергетических систем. Проведя анализ можно сделать следующие выводы:

1. Современные технологии мониторинга обеспечивают более высокую точность и детализацию данных по сравнению с традиционными методами, что позволяет своевременно выявлять потенциальные проблемы;

2. Использование современных систем мониторинга позволяет получать и обрабатывать данные в реальном времени, что значительно сокращает время реагирования на неисправности;

3. Начальные инвестиции в современные технологии могут быть высокими, их долгосрочные выгоды делают их более экономически эффективными;

4. Современные технологии снижают риски для специалистов, т.к. позволяют проводить инспекции без непосредственного доступа к опасным объектам, что повышает общую безопасность эксплуатации;

5. Интеграция современных технологий в процессы мониторинга и обслуживания линий электропередач способствует более эффективному планированию и управлению ресурсами, что улучшает надежность и устойчивость энергетической инфраструктуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Alhassan A.B., Zhang X., Shen H. [et al.].* Precise Motion Control of a Power Line Inspection Robot Using Hybrid Time Delay and State Feedback Control // Frontiers in Robotics and AI. – 2022. – Vol. 9. – DOI: 10.3389/frobt.2022.746991. – EDN BCROIB.
2. *Fan W., Zhang S., Zhu W., Zhu H.* An efficient dynamic formulation for the vibration analysis of a multi-span power transmission line excited by a moving deicing robot // Applied Mathematical Modelling. – 2022. – Vol. 103. – P. 619-635. – DOI: 10.1016/j.apm.2021.10.040. – EDN ZPBNPT.
3. *Li X.P., Shang D.Y., Li F.J., Cao W.L.* Dynamic Modeling and DME Evaluation of Power Transmission Line Inspection Robots // Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University. – 2020. – Vol. 41, No. 9. – P. 1280-1284. – https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2020.09.011.
4. *Chen M., Tian Yu., Xing Sh. [et al.].* Environment Perception Technologies for Power Transmission Line Inspection Robots // Journal of Sensors. – 2021. – Vol. 2021, No. 1. – P. 10.1155/2021/5559231. – DOI: 10.1155/2021/5559231. – EDN XLWPAO.
5. *Rigatos G., Zervos N., Siano P. [et al.].* A nonlinear optimal control approach for underactuated power-line inspection robots // Robotica. – 2022. – Vol. 40, No. 6. – P. 1979-2009. – DOI: 10.1017/s026357472100148x. – EDN HKYIBX.
6. *Afanaseva Olga, Tulyakov Timur, Romashin Daniil and Panova Anastasia.* Development of a Robotic Complex for the Manufacture of Parts Used in Civil Engineering // Engineering Research Transcripts. – 2023. – 3. – P. 51-58. – DOI: https://doi.org/10.55084/grinrey/ERT/978-81-964105-0-6_6.
7. *Disyadej T., Kwanmuang S., Muneesawang P. [et al.].* Smart Transmission Line Maintenance and Inspection using Mobile Robots // Advances in Science, Technology and Engineering Systems. – 2020. – Vol. 5, No. 3. – P. 493-500. – DOI: 10.25046/aj050361. – EDN FXDUVY.
8. *Wang, Y., Yuan Ch., Zhai Y.* Mechanism Design and Analysis of a New Overhead Transmission Line Inspection Robot // Xibei Gongye Daxue Xuebao. – 2020. – Vol. 38, No. 5. – P. 1105-1111. – DOI: 10.1051/jnwpu/20203851105. – EDN UZPTHH.
9. *Великанов В.С.* Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 29-36. – DOI: 10.31897/PMI.2020.1.29.
10. *Крестовников К.Д., Черских Е.О., Савельев А.И.* Исследование влияния длины промежуточного магнитопровода на характеристики магнитного захвата для робототехнических комплексов горнодобывающей промышленности // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 46-52. – DOI: 10.31897/PMI.2020.1.46.
11. *Yuan L.* Fabrication of metallic parts with overhanging structures using the robotic wire arc additive manufacturing // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 63. – P. 24-34. – https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.03.018.
12. *Blatnický M., Dižo J., Gerlici J. [et al.].* Design of a robotic manipulator for handling products of automotive industry // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2020. – Vol. 17, No. 1. – DOI: 10.1177/1729881420906290. – EDN NKYYJJ.
13. *Ja.F.O. Mammadov, Valiyeva B.A.K., Huseynova A.S.G., Hasanova Ye.M.G.* Development of diagnostic subsystem for manufacturing active elements in instrument-making industry // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics. – 2022. – No. 1. – P. 16-21. – DOI: 10.24143/2073-5529-2022-1-16-21. – EDN JPEWZU.
14. *Kakou P., Bukhari M., Wang J., Barry O.* On the vibration suppression of power lines using mobile damping robots // Engineering Structures. – 2021. – Vol. 239. – P. 112312. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112312. – EDN CHTAXH.
15. *Qin X., Jia Bo., Lei J. [et al.].* A novel flying–walking power line inspection robot and stability analysis hanging on the line under wind loads // Mechanical Sciences. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – P. 257-273. – DOI: 10.5194/ms-13-257-2022. – EDN SJCYNJ.
16. *Mal'Tsev P.A., Shatilova N.A., Abramkin S.E. and Podkina M.E.* Designing a Digital Twin in Oil and Gas Technologies: Technology Integration // 2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024. – P. 352-355. – DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554148.
17. *Boronko E.A. and Novozhilov I.M.* Designing an Information System for Monitoring the Electromagnetic Field of a Power Plant // 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024. – P. 331-334. – DOI: 10.1109/ElCon61730.2024.10468204.
18. *Blaga F.S., Pop A., Hule V., and Indre C.I.* The efficiency of modeling and simulation of manufacturing systems using Petri nets // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1169: 012005. – https://doi.org/ 10.1088/1757-899x/1169/1/012005.
19. *Pershin I.M., Kukharova T.V., Tsapleva V.V.* Designing of distributed systems of hydrolithosphere processes parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials // Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg, Virtual, 14–17 апреля 2020 года. – Saint Petersburg, Virtual, 2021. – P. 012017. – DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012017. – EDN SLJOFN.

20. *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, Moscow, 26–28 января 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 975-978. – DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396273. – EDN JYZAHJ.
21. *Ilyushin Y., Mokeev A.* The control system of the thermal field in tunnel furnace of a Conveyor type // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 12, No. 22. – P. 6595-6605. – EDN XNXPUK.
22. *Сырков А.Г., Маховиков А.Б., Томаев В.В., Тарабан В.В.* Приоритет в области нанотехнологий Горного университета в Санкт-Петербурге - современного центра разработки новых наноструктурированных металлических материалов // Цветные металлы. – 2023. – № 8. – С. 5-13. – DOI: 10.17580/tsm.2023.08.01. – EDN NQMQQJ.
23. *Waleed D., Tariq U., Mukhopadhyay S., El-Hag A.H.* Drone-Based Ceramic Insulators Condition Monitoring // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Vol. 70. – P. 9427080. – DOI: 10.1109/TIM.2021.3078538. – EDN QPWOJO.
24. *Huang Zh., Zhai X., Wang H. [et al.].* On the 3D Track Planning for Electric Power Inspection Based on the Improved Ant Colony Optimization and A∗ Algorithm // Mathematical Problems in Engineering. – 2020. – Vol. 2020. – P. 8295362. – DOI: 10.1155/2020/8295362. – EDN DIXFUV.
25. *Suarez A., Salmoral R., Zarco-Perinan P.J., Ollero A.* Experimental Evaluation of Aerial Manipulation Robot in Contact With 15 kV Power Line: Shielded and Long Reach Configurations // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 94573-94585. – DOI: 10.1109/access.2021.3093856. – EDN YIFYQO.

REFERENCES

1. *Alhassan A.B., Zhang X., Shen H. [et al.].* Precise Motion Control of a Power Line Inspection Robot Using Hybrid Time Delay and State Feedback Control, *Frontiers in Robotics and AI,* 2022, Vol. 9. DOI: 10.3389/frobt.2022.746991. – EDN BCROIB.
2. *Fan W., Zhang S., Zhu W., Zhu H.* An efficient dynamic formulation for the vibration analysis of a multi-span power transmission line excited by a moving deicing robot, *Applied Mathematical Modelling,* 2022, Vol. 103, pp. 619-635. DOI: 10.1016/j.apm.2021.10.040. – EDN ZPBNPT.
3. *Li X.P., Shang D.Y., Li F.J., Cao W.L.* Dynamic Modeling and DME Evaluation of Power Transmission Line Inspection Robots, *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University,* 2020, Vol. 41, No. 9, pp. 1280-1284. Available at: https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2020.09.011.
4. *Chen M., Tian Yu., Xing Sh. [et al.].* Environment Perception Technologies for Power Transmission Line Inspection Robots, *Journal of Sensors,* 2021, Vol. 2021, No. 1, pp. 10.1155/2021/5559231. DOI: 10.1155/2021/5559231. EDN XLWPAO.
5. *Rigatos G., Zervos N., Siano P. [et al.].* A nonlinear optimal control approach for underactuated power-line inspection robots, *Robotica,* 2022, Vol. 40, No. 6, pp. 1979-2009. DOI: 10.1017/s026357472100148x. EDN HKYIBX.
6. *Afanaseva Olga, Tulyakov Timur, Romashin Daniil and Panova Anastasia.* Development of a Robotic Complex for the Manufacture of Parts Used in Civil Engineering, *Engineering Research Transcripts*, 2023, 3, pp. 51-58. DOI: https://doi.org/10.55084/grinrey/ERT/978-81-964105-0-6_6.
7. *Disyadej T., Kwanmuang S., Muneesawang P. [et al.].* Smart Transmission Line Maintenance and Inspection using Mobile Robots, *Advances in Science, Technology and Engineering Systems,* 2020, Vol. 5, No. 3, pp. 493-500. DOI: 10.25046/aj050361. EDN FXDUVY.
8. *Wang, Y., Yuan Ch., Zhai Y.* Mechanism Design and Analysis of a New Overhead Transmission Line Inspection Robot, *Xibei Gongye Daxue Xuebao,* 2020, Vol. 38, No. 5, pp. 1105-1111. DOI: 10.1051/jnwpu/20203851105. EDN UZPTHH.
9. *Velikanov V.S.* Prognozirovanie nagruzhennosti rabochego oborudovaniya kar'ernogo ekskavatora po nechetko-logisticheskoy modeli [Mining excavator working equipment load forecasting according to a fuzzy-logistic model], *Zapiski Gornogo institute* [Journal of Mining Institute], 2020, Vol. 241, pp. 29-36. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.29.
10. *Krestovnikov K.D., Cherskikh E.O., Savel'ev A.I.* Issledovanie vliyaniya dliny promezhutochnogo magnitoprovoda na kharakteristiki magnitnogo zakhvata dlya robototekhnicheskikh kompleksov gornodobyvayushchey promyshlennosti [Investigation of the influence of the length of the intermediate magnetic circuit on the characteristics of magnetic gripper for robotic complexes of the mining industry], *Zapiski Gornogo institute* [Journal of Mining Institute], 2020, Vol. 241, pp. 46-52. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.46.
11. *Yuan L.* Fabrication of metallic parts with overhanging structures using the robotic wire arc additive manufacturing, *Journal of Manufacturing Processes,* 2021, Vol. 63, pp. 24-34. Available at: https://doi.org/ 10.1016/j.jmapro.2020.03.018.

12. *Blatnický M., Dižo J., Gerlici J. [et al.].* Design of a robotic manipulator for handling products of automotive industry, *International Journal of Advanced Robotic Systems,* 2020, Vol. 17, No. 1. DOI: 10.1177/1729881420906290. EDN NKYYJJ.
13. *Ja.F.O. Mammadov, Valiyeva B.A.K., Huseynova A.S.G., Hasanova Ye.M.G.* Development of diagnostic subsystem for manufacturing active elements in instrument-making industry, *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics,* 2022, No. 1, pp. 16-21. DOI: 10.24143/2073-5529-2022-1-16-21. EDN JPEWZU.
14. *Kakou P., Bukhari M., Wang J., Barry O.* On the vibration suppression of power lines using mobile damping robots, *Engineering Structures,* 2021, Vol. 239, pp. 112312. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112312. EDN CHTAXH.
15. *Qin X., Jia Bo., Lei J. [et al.].* A novel flying–walking power line inspection robot and stability analysis hanging on the line under wind loads, *Mechanical Sciences,* 2022, Vol. 13, No. 1, pp. 257-273. DOI: 10.5194/ms-13-257-2022. EDN SJCYNJ.
16. *Mal'Tsev P.A., Shatilova N.A., Abramkin S.E. and Podkina M.E*. Designing a Digital Twin in Oil and Gas Technologies: Technology Integration, *2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024,* pp. 352-355. DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554148.
17. *Boronko E.A. and Novozhilov I.M.* Designing an Information System for Monitoring the Electromagnetic Field of a Power Plant, *2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024,* pp. 331-334. DOI: 10.1109/ElCon61730.2024.10468204.
18. *Blaga F.S., Pop A., Hule V., and Indre C.I.* The efficiency of modeling and simulation of manufacturing systems using Petri nets, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 2021, Vol. 1169: 012005. Available at: https://doi.org/ 10.1088/1757-899x/1169/1/012005.
19. *Pershin I.M., Kukharova T.V., Tsapleva V.V.* Designing of distributed systems of hydrolithosphere processes parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials, *Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg, Virtual, 14–17 апреля 2020 года*. Saint Petersburg, Virtual, 2021, pp. 012017. DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012017. EDN SLJOFN.
20. *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, Moscow, 26–28 January 2021*. Moscow, 2021, pp. 975-978. DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396273. EDN JYZAHJ.
21. *Ilyushin Y., Mokeev A.* The control system of the thermal field in tunnel furnace of a Conveyor type, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences,* 2017, Vol. 12, No. 22, pp. 6595-6605. EDN XNXPUK.
22. *Syrkov A.G., Makhovikov A.B., Tomaev V.V., Taraban V.V.* Prioritet v oblasti nanotekhnologiy Gornogo universiteta v Sankt-Peterburge - sovremennogo tsentra razrabotki novykh nanostrukturirovannykh metallicheskikh materialov [Priority in the field nanotechnologies of the mining university in saint petersburg — a modern centre for the development of new nanostructured metallic materials], *Tsvetnye metally* [Tsvetnye Metally], 2023, No. 8, pp. 5-13. DOI: 10.17580/tsm.2023.08.01. EDN NQMQQJ.
23. *Waleed D., Tariq U., Mukhopadhyay S., El-Hag A.H.* Drone-Based Ceramic Insulators Condition Monitoring, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* 2021, Vol. 70, pp. 9427080. DOI: 10.1109/TIM.2021.3078538. EDN QPWOJO.
24. *Huang Zh., Zhai X., Wang H. [et al.].* On the 3D Track Planning for Electric Power Inspection Based on the Improved Ant Colony Optimization and A∗ Algorithm, *Mathematical Problems in Engineering,* 2020, Vol. 2020, pp. 8295362. DOI: 10.1155/2020/8295362. EDN DIXFUV.
25. *Suarez A., Salmoral R., Zarco-Perinan P.J., Ollero A.* Experimental Evaluation of Aerial Manipulation Robot in Contact With 15 kV Power Line: Shielded and Long Reach Configurations, *IEEE Access,* 2021, Vol. 9, pp. 94573-94585. DOI: 10.1109/access.2021.3093856. EDN YIFYQO.

Афанасьева Ольга Владимировна – Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; e-mail: Afanaseva_OV@pers.spmi.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; к.т.н.; доцент.

Туляков Тимур Фаритович – Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; e-mail: timur210600@icloud.com; г. Санкт-Петербург, Россия; аспирант.

Afanaseva Olga Vladimirovna – Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University; e-mail: Afanaseva_OV@pers.spmi.ru; Saint Petersburg, Russia; cand. of eng. sc; associate professor.

Tulyakov Timur Faritovich – Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University; e-mail: timur210600@icloud.com; Saint Petersburg, Russia; postgraduate student.

УДК 519.6:504.3.054 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-189-200

Д.А. Богданец, В.И. Грищенко, К.Ф. Калмыкова, А.И. Рахманов, Д.С. Цымбалов

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ГОРЕЛКИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ФАКЕЛА

Для расчета химического состава дымовых газов горелки на углеводородном топливе с комбинированным формированием факела предложен удобный и надежный алгоритм, основанный на методах математического программирования. Обеспечение устойчивости вычислительного процесса достигается использованием метода констант равновесия в целях снизить размерность системы определяющих уравнений при надлежащем выборе номенклатуры реагентов и базисных веществ. В модели рассматриваются двадцать два реагента, значительная доля которых токсичны, а базисными веществами выбраны CO, H_2,O_2 и N_2. Вычисление констант равновесия осуществляется на основании оригинальной аппроксимации температурной зависимости теплоемкости всех компонентов. Предложенная аппроксимация, в отличие от стандартных полиномиальных, не только дает физически обоснованные пределы в области низких и высоких температур, но и содержит вдвое меньше подгоночных параметров. Отработана методика расчета этих параметров по известным табличным значениям. Предварительное тестирование модели выполнялось для отдельных химических блоков (номенклатурных подмножеств) путем сравнения результатов расчета с данными, получаемыми при помощи химического калькулятора JANAF. Расчеты токсичности дымовых газов опытного горелочного устройства с формированием факела посредством электрической дуги и подачи перегретого пара выполнены в диапазоне рабочих параметров, расширенном по сравнению с предполагаемым эксплуатационным. Результат обобщен методами математического программирования с учетом взвешенной токсичности дымовых газов. Выполнена оценка погрешности формульного представления токсичности. Предложен интерполяционный алгоритм, позволяющий уточнить взвешенную токсичность дымовых газов во всем диапазоне сценарного моделирования. Результаты компьютерного моделирования сопоставлялись с данными технических испытаний опытной горелки: установлено их согласие в пределах множителя 2, что соответствует методической и приборной погрешности измерений. Полученные в вычислительном эксперименте результаты позволяют оптимизировать конструкцию и рабочие параметры инновационных горелочных устройств с комбинированным механизмом формирования факела. Расчетами показано и экспериментально подтверждено, что подача перегретого пара в зону горения гомогенизирует факел, выравнивает скорость окисления водорода и углерода в составе нефтяного топлива, чем сокращает выбросы продуктов неполного сгорания и оксидов азота. Разработка предлагается для использования в проектировании, технических испытаниях и доводке перспективных горелочных устройств на нефтяном, спиртовом и биотопливе.

Жидкотопливное горелочное устройство; токсичность; комбинированная интенсификация; химические реакции; математическая модель.

D.A. Bogdanets, V.I. Grishchenko, K.F. Kalmykova, A.I. Rakhmanov, D.S. Tsymbalov

THEORITICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF TOXICITY OF FLUE GASES OF A BURNER WITH COMBINED FLAME FORMATION

A convenient and reliable algorithm based on mathematical programming methods is proposed for calculating the chemical composition of flue gases from a hydrocarbon-fueled burner with combined flame formation. The stability of the computational process is ensured by using the equilibrium constant method in order to reduce the dimensionality of the system of governing equations with an appropriate choice of the nomenclature of reagents and base substances. The model considers twenty-two reagents, a significant proportion of which are toxic, and CO, H_2, O_2 and N_2 are selected as base substances. The equilibrium constants are calculated based on an original approximation of the temperature dependence of the heat capacity of all components. The proposed approximation, unlike standard polynomial ones, not only provides physically justified limits in the region of low and high temperatures, but also contains twice as few fitting parameters. A technique for calculating these parameters using known tabular values has been developed. Preliminary testing of the model was performed for individual chemical blocks (nomenclature subsets) by comparing the calculation results with the data obtained using the JANAF chemical calculator. Calculations of toxicity of flue gases of the experimental burner device with formation of a torch by means of an electric arc and supply of superheated steam are performed in the

range of operating parameters extended in comparison with the expected operational one. The result is generalized by methods of mathematical programming taking into account the weighted toxicity of flue gases. An estimate of the error of the formula representation of toxicity is performed. An interpolation algorithm is proposed that allows specifying the weighted toxicity of flue gases in the entire range of scenario modeling. The results of computer modeling were compared with the data of technical tests of the experimental burner: their agreement was established within the multiplier of 2, which corresponds to the methodological and instrumental measurement error. The results obtained in the computational experiment allow optimizing the design and operating parameters of innovative burner devices with a combined mechanism of torch formation. Calculations have shown and experimentally confirmed that the supply of superheated steam to the combustion zone homogenizes the flame, equalizes the rate of oxidation of hydrogen and carbon in the oil fuel, thereby reducing emissions of incomplete combustion products and nitrogen oxides. The development is proposed for use in the design, technical testing and fine-tuning of promising burner devices on oil, alcohol and biofuel..

Liquid fuel burner, toxicity, combined intensification, chemical reactions, mathematical model.

Введение. Развитие теплоэнергетики опирается на непрерывное конструктивно-функциональное совершенствование горелочных устройств (ГУ) малой и средней мощности (1-10 МВт), использующих различные углеводородные (C_nH_m), а также альтернативные (спиртовые и био-) топлива [1]. Отечественные потребители таких ГУ оказались в сложной ситуации по двум причинам: во-первых, экономические санкции существенно ограничили ввоз импортных горелок, а во-вторых, обострился спрос на применение в теплоэнергетике тяжелых углеводородов (мазутов и гудронов), доля которых в нефтяных запасах страны существенна. Таким образом, перед отечественными разработчиками ГУ остро стоит задача создания масштабируемой конструкции с высокими показателями экономичности и экологической чистоты [2].

Информационное моделирование высокотехнологичных изделий, в т.ч. энергетического назначения не только результативный, но часто единственный способ найти приемлемое решение. Компьютерные эксперименты с моделями позволяют снижать техногенные риски и экологические издержки, что позволяет отнести компьютерную имитацию взаимодействия технических систем с рабочими и окружающими средами к приоритетным методикам прикладных исследований [3]. Соответственно ужесточаются требования к предметным математическим моделям (ММ), касающиеся фундаментальности, детальности и эффективности. Их комплекс зафиксирован в государственных стандартах на цифровые двойники (ЦД) изделий и процессов. Поэтому цель данного исследования – адекватное описание токсичности дымовых газов (ДГ) при различных режимах работы ГУ с комбинированной интенсификацией сжигания жидких углеводородов, спиртов и биотоплива представляется актуальной для теплоэнергетики. Схема ГУ и особенности рабочего процесса, выбранные для отработки ММ показаны на рис. 1.

Важно подчеркнуть, что практические расчеты химического состава ДГ представляют собой сложную научную задачу. Проблемность обусловлена следующими обстоятельствами: горючая смесь и продукты сгорания многокомпонентны и многофазны, окисление топлива и образование промежуточных и побочных токсичных компонентов – нелинейный и пространственно распределенный процесс, знания термохимических и особенно кинетических параметров системы ограничены, краевые условия определены приближенно, а некоторые сопутствующие факторы невозможно учесть. Даже в предположении совершенного сжигания, т.е. образования ДГ с равновесным составом, не удается исключить все сопутствующие проблемы [4]. Главными трудностями выступают: 1) необходимость обеспечить достоверность и согласованность исходных теромохимических данных; 2) обеспечение достаточной универсальности реализующих алгоритмов, по крайней мере, в рамках практически интересной номенклатуры веществ и диапазона рабочих параметров; 3) количественная оценка надежности результата, в т.ч. его непрерывная зависимость от номенклатурно-числовых параметров ММ и исходных данных.

Для расчета равновесного состава используются два формально равноценных метода. Отечественные исследователи предпочитают непосредственно минимизировать термохимический потенциал (ТХП) Гиббса – Гельмгольца [5–7], а для западных физико-

химических школ традиционен метод констант равновесия, интегрирующий уравнения виртуальных реакций, материального баланса и состояния вещества [8–10]. Главным недостатком прямой минимизации ТХП является высокая размерность и одновременно плохая обусловленность матриц, возникающих в процессе линеаризации уравнений экстремума. Например, для химической модели, включающей N химических элементов и M веществ, система уравнений равновесия в алгоритме прямой минимизации ТХП имеет размерность $N + M$. Ее численное решение требует значительно усложнять алгоритм, насыщая его тонкостями матричной алгебры [11–13]. Метод констант равновесия реализовать проще, поскольку размерность системы в этом случае совпадает с числом элементов N. Опыт авторов по применению стандартных пакетов вычислительной математики [14, 15] в расчетах состава продуктов сгорания реактивных и моторных топлив показывает, что итерационный вычислительный процесс непосредственной минимизации ТХП становится неустойчивым, когда число учитываемых веществ превышает 10-13. Поэтому в данной работе для расчета состава ДГ отрабатываемого ГУ предлагается использовать метод констант равновесия и пакеты [14, 15].

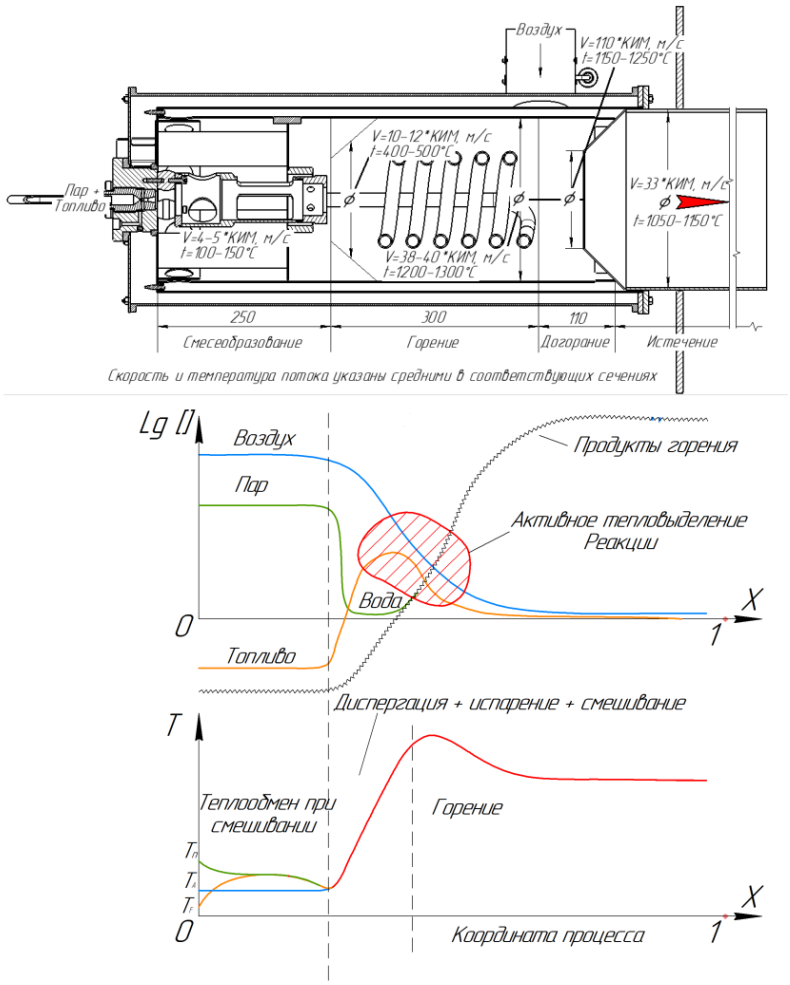


Рис. 1. Конструкция и схема рабочего процесса ГУ

Структура математической модели и исходные данные. Ключевую роль в подобных расчетах играет выбор номенклатуры учитываемых веществ и т.н. химического базиса – минимального набора линейно независимых компонентов из множества рас-

сматриваемых. Определение номенклатуры компонентов опирается на известные экспериментальные и расчетные данные, теоретические и экспертные оценки. В частности, горение моторных и ракетных топлив удовлетворительно описывается схемой превращений [16]. Отметим, что процессы в ГУ практически необратимы. Это означает, что при качественной организации рабочего процесса ДГ не содержат высокомолекулярных углеводородов.

Опыт решения задач горения и предварительные оценки показывают, что ограничившись реакциями в горячей области факела, целесообразно ограничиться следующими веществами из схемы реагирования [16]: 1) углеводородами C, CH, CH_2, C_2H_4; 2) атомной H и молекулярной H_2 формами водорода; 3) кислородными O_2 и O веществами; 3) основными оксидами водорода OH, HO_2, H_2O, H_2O_2; 4) оксидами углерода CO, CO_2; 5) азотом с оксидами N_2, N, NO, N_2O, NO_2, а также 6) особо токсичными соединениями C_2N_2, HCN и 7) C_2H_2, служащим источником сажи и онкогенного бенз(а)пирена. Предлагаемая модель объединяет двадцать два C-H-N-O-содержащих вещества; химическим базисом согласно [10] служат CO, H_2, O_2 и N_2.

Основу ММ составляют закон сохранения вещества для трех элементов и закон Дальтона для газовых смесей:

$$\sum_{m=1}^{M}\left(\frac{P_{\mathrm{H}}}{P}\right)_m = \sum_{m=1}^{M}\left(\frac{P_{\mathrm{H}}}{P}\right)_m^{\mathrm{init}}, \quad \sum_{m=1}^{M}\left(\frac{P_{\mathrm{N}}}{P}\right)_m = \sum_{m=1}^{M}\left(\frac{P_{\mathrm{N}}}{P}\right)_m^{\mathrm{init}},$$
$$\sum_{m=1}^{M}\left(\frac{P_{\mathrm{O}}}{P}\right)_m = \sum_{m=1}^{M}\left(\frac{P_{\mathrm{O}}}{P}\right)_m^{\mathrm{init}}, \quad \sum_{m=1}^{M} P_m = P, \tag{1}$$

где $\left(\frac{P_n}{P}\right)_m$ – доля атомов i-го сорта (i = H, N, O) в -м веществе; P_m – парциальное давление m-го вещества; P – общее давление; индекс init соответствует начальным условиям.

Парциальное давление небазисных 18-ти веществ рассчитывается на основе констант равновесия виртуальных химических реакций [8, 10]:

$$K_{\text{равн}} = \exp\left(-\Delta G/RT\right), \tag{2}$$

где $\Delta G = G_{\mathrm{P}} - G_{\mathrm{R}}$ – изменение термохимического потенциала; индексы P и R обозначают продукты и исходные вещества; T – температура; R – газовая постоянная.

ТХП вещества G_m представляет собой комбинацию энтальпийного H_m и энтропийного S_m слагаемых:

$$G_m = H_m - T \cdot S_m. \tag{3}$$

Также при расчете химического равновесия крайне важна температурная зависимость $G_m(T)$. Она обусловлена существенным влиянием температуры на теплоемкость газов $C_{\mathrm{P}\,m}(T)$ и соответствующими термодинамическими соотношениями:

$$H_m(T) = H_m(298.15) + \int_{298.15}^{T} C_{P\,m}(T)\,dT, \tag{4}$$

и

$$S_m(T) = S_m(298) + \int_{298.15}^{T} C_{P\,m}(T)/T\,dT. \tag{5}$$

Традиционно функцию $C_{\mathrm{P}\,m}(T)$ приближают многочленами [17], однако такой подход не только не убедителен с физической точки зрения, но и не рационален в части объема вычислений. Фактически теплоемкость веществ в газовой фазе напрямую связана с числом активных степеней свободы (поступательных, вращательных и колебательных). Если поступательные и вращательные степени свободы (их в совокупности три для одноатомных газов, пять для двухатомных и многоатомных линейных молекул и шесть для трех- и многоатомных газов) всегда накапливают тепловую энергию, то колебательные степени свободы (число таковых растет со сложностью молекулы) задействуются лишь при высокой температуре. Поэтому здесь предлагается аппроксимация $C_{P\,m}(T)$ вида:

$$C_P(A,B,C,\,C_0,T) = C_0 + A\cdot\left[1 - \mathrm{e}^{-\left(\frac{T}{B}\right)^C}\right], \tag{6}$$

$$H(A,B,C,\ C_0,T) = \ H_0 + \int_{298.15}^{T} C_P(A,B,C,\ C_0,T)\ dT, \quad (7)$$

$$S(A,B,C,\ C_0,T) = \ S_0 + \int_{298.15}^{T} \frac{C_P(A,B,C,C_0,T)}{T}\ dT. \quad (8)$$

В этих формулах C_0, H_0 и S_0 – соответственно теплоемкость, энтальпия и энтропия компонента при стандартной температуре 298,15 К; *A*, *B*, *C* – подгоночные коэффициенты. Таким образом, модель (6)-(8) не только верна в предельных случаях $T \to 0$ и $T \to \infty$, но также содержит всего три, а не семь как полиномиальная модель [17], эмпирических коэффициента. Для их нахождения достаточен минимальный объем табличных данных.

Коэффициент *A* отвечает приращению теплоемкости в интервале температур от нуля до бесконечности, т.е.:

$$A = \ \lim_{T\to\infty} C_P(A,B,C,\ C_0,T) - \ \lim_{T\to 0} C_P(A,B,C,\ C_0,T), \quad (9)$$

Величина *B* соответствует температуре возбуждения внутренних (колебательных) степеней свободы, а значение *C* отвечает ширине температурного диапазона, в котором теплоемкость C_P изменяется существенно.

Чтобы вычислить *A*, *B*, *C* – параметры модели (6)-(8), необходимо решить следующую задачу математического программирования:

$$\begin{cases} \sum_i \left[C_P(A,B,C,\ C_0,T) - \left\{C_0 + A\cdot[\,1 - \mathrm{e}^{-(\frac{T}{B})^C}\right\}\right]^2 \to \ \min \\ \sum_i \left[S(A,B,C,\ C_0,T) - \left\{S_0 + \int_{298.15}^{T} \frac{C_P(A,B,C,\ C_0,T)}{T}\ dT\right\}\right]^2 \to \ \min \end{cases}, \quad (10)$$

где *i* – число табулированных значений термодинамических функций в таблицах JANAF [18], использованных для получения приближенных выражений (6)-(8).

Результаты решения (10) для учтенных в модели веществ приведены в табл. 1. Поскольку одноатомные газы не имеют колебательных степеней свободы, их теплоемкость при рабочей температуре ГУ будем считать постоянной, т.е. *A* = 0. Также величина $C_0 = \lim_{T\to 0} C_P(A,B,C,\ C_0,T)$ выбрана совпадающей с теоретическим значением согласно молекулярной теории газов (5/2 *R* – для одноатомных, 7/2 *R* – для линейных многоатомных и 4 *R* – для нелинейных многоатомных молекул).

Таблица 1

Расчетные значения эмпирических коэффициентов модели (6)-(8)

Вещество	Коэффициент		
	A	*B*	*C*
CO	0,942	1217	2,21
O_2	1,313	1342	1,47
H_2	1,022	2037	2,643
N_2	0,938	1320	2,123
CO_2	3,401	811,953	1,503
O	0	10000	2
H	0	10000	2
N	0	10000	2
NO	0,987	1097	1,857
N_2O	3,312	731,007	1,439
NO_2	2,846	742,784	1,634
OH	0,998	1899	2,124
HO_2	2,696	1011	1,587

Окончание табл. 1

H_2O	2,743	1575	1,971
H_2O_2	4,326	631,075	1,38
CH	1,46	1546	2,666
CH_2	3,186	1190	2,174
CH_4	8,005	1123	1,838
C_2H_2	6,633	983,73	1,108
C_2H_4	10,951	956,5	1,526
C_2N_2	6,387	546,09	0,862
HCN	3,341	1052	1,437

Вычислив в квадратурах интегралы в уравнениях (7)–(8) реализуем более продуктивное вычисление констант равновесия:

$$H(A,B,C,H_0,C_0,T) = H_0 + (C_0 + A)(T - 298{,}15) + \\ + \frac{AB}{C}\left[\Gamma\left(\frac{1}{C}, \left(\frac{T}{B}\right)^C\right) - \Gamma\left(\frac{1}{C}, \left(\frac{298{,}15}{B}\right)^C\right)\right], \quad (11)$$

Подобного рода действия в случае с энтропией выполнить не получится, по причине невозможности выразить интеграл через доступные специальные функции. В предшествующем случае сведение к неполной Гамма-функции осуществлялось интегрированием выражения типа $\int e^{-t^n} dt$, а образование в знаменателе дополнительной переменной t приводит к невозможности получить результат. Из-за своеобразности подынтегрального выражения применение для интегрирования разложения в ряд Тейлора не допускается. В связи с этим выполним следующие действия: подынтегральное выражение e^{-t^n} представим как $e^{-(t^n + \ln(t))}$. Поскольку в нашем случае $t = \frac{T}{B}$ заключено в пределах $\frac{1}{3} \ldots 3$, а величина n от 1 до 2.5, заменим подынтегральное выражение $e^{-t^c} \cdot \frac{1}{t}$ на приближенное $(\alpha + \beta t)e^{-\gamma t}$, которое легко интегрируется по частям. В результате получаем приблизительное к уравнению (8) значение:

$$S(A,B,C,S_0,C_0\,T) \approx S_0 + (C_0 + A)\ln\left(\frac{T}{298.15}\right) - AB\int_{\frac{298.15}{B}}^{\frac{T}{B}} (\alpha + \beta t)e^{-\gamma t}\, d = \\ = S_0 + (C_0 + A)\ln\left(\frac{T}{298.15}\right) + \\ \frac{A}{\gamma^2}\left[(\alpha\gamma B + \beta\gamma T + \beta B)e^{\frac{-\gamma T}{B}} - (\alpha\gamma B + 298.15\beta\gamma + \beta B)e^{\frac{-298.15\gamma}{B}}\right]. \quad (12)$$

Сравнивая друг результаты расчетов по формуле (12) и данные полученные при численном интегрировании исходной зависимости (8) определяется погрешность данного приближения. Выявлено, что в диапазоне актуальных значений n погрешность (12) не выходит за пределы 25%.

Путем решения системы нелинейных уравнений рассчитываются значения подгоночных параметров $\alpha - \gamma$:

$$\begin{cases} \left(\alpha + \frac{1}{3}\beta\right)e^{\frac{-\gamma}{3}} = 3e^{-\left(\frac{1}{3}\right)^n} \\ (\alpha + \beta)e^{-\gamma} = e^{-1} \\ (\alpha + 3\beta)e^{-3\gamma} = \frac{1}{3}e^{-(3)^n} \end{cases} \quad (13)$$

Решение в явном виде, выполненное в пакете Maple, в силу своей громоздкости в тексте статьи не приводится. Сюда выведена только оценка погрешности аппроксимации и приближенного интегрирования (12) на рис. 2, а также числовые значения параметров $\alpha - \gamma$ в зависимости от n с оценкой надежности соответствующего результата на рис. 3.

```
> sys:={(alpha+beta/3)*exp(-g/3)=exp(-(1/3)^n)*3,(alpha+beta)*exp(-g)=exp(-1)*1,(alpha+be
  ta*3)*exp(-g*3)=exp(-(3)^n)/3}: n:=2:
> fsolve(sys,{alpha,beta,g});
> alpha:=7.070740987: beta:=-2.327522967: g:=2.556715812:
> plot([exp(-t^2)/t,(alpha+beta*t)*exp(-g*t),(exp(-t^2)/t-(alpha+beta*t)*exp(-g*t))*10],t
  =0.3..3,thickness=[15,5,5],color=[yellow,blue,green]);
```

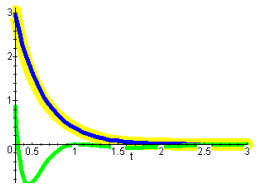


Рис. 2. Алгоритм расчета коэффициентов $\alpha - \gamma$ и их погрешность: желтая линия – исходная функция; синяя – аппроксимация; зеленая – увеличенная в 10 раз погрешность

n	alpha	beta	gamma
3	7,896	-2,632	2,66
2,9	7,845	-2,615	2,654
2,8	7,789	-2,596	2,647
2,7	7,726	-2,575	2,639
2,6	7,657	-2,552	2,63
2,5	7,581	-2,527	2,62
2,4	7,497	-2,499	2,609
2,3	7,403	-2,467	2,597
2,2	7,302	-2,431	2,583
2,1	7,191	-2,386	2,57
2	7,071	-2,328	2,557
1,9	6,943	-2,241	2,548
1,8	6,812	-2,1	2,55
1,7	6,684	-1,835	2,578
1,6	6,582	-1,049	2,711

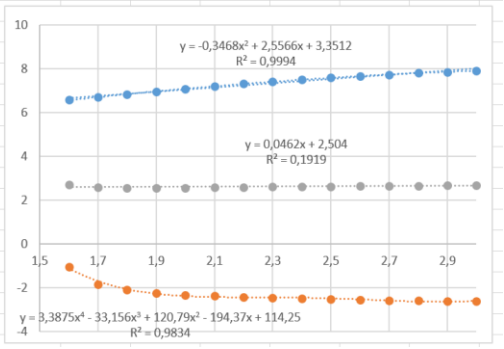


Рис. 3. Коэффициенты аппроксимации (12)

Тестирование модели, условия и результаты компьютерного эксперимента. В компьютерном эксперименте состав пламени и ДГ описывался совокупностью веществ CH – CH_2 – CH_4 – C_2H_2 – C_2H_4 – H – H_2 – O – O_2 – CO – CO_2 – OH – HO_2 – H_2O – H_2O_2 – N – N_2 – NO – N_2O – NO_2 – C_2N_2 – HCN в диапазоне температур 900 – 1500 K при давлении 1 бар; коэффициент избытка воздуха α варьировался в интервале 0.7–1.3, а соотношение массовой подачи пара и топлива β – в пределах 0–0.3. Предварительно выполнялась проверка ММ и исходных данных путем сопоставления результатов компьютерной имитации отдельных химических подсистем в контрольных точках (температура, давление, элементный состав реагентов) с online-версией программного комплекса JANAF [19, 20]. Результаты верификации свидетельствуют, что содержание основных компонентов системы (веществ, мольная доля которых 10^{-6} и более) удается рассчитать с приемлемой погрешностью. В то же время малые составляющие системы оказываются значительно зашумленными. Компьютерный эксперимент по переносу алгоритма в пакет Maple [14] с целью существенно удлинить мантиссу рабочих чисел показал, что обусловленная конечностью мантиссы неустойчивость гасится уже в режиме двойной точности (пятнадцать значащих цифр), после чего сходимость процесса удается обеспечить исключительно качеством начального приближения.

Опыт сценарной имитации различных режимов ГУ систематизировался в контексте результирующей токсичности, т.е. взвешенного учета сравнительной угарного газа, окислов азота и углеводородов:

$$R_{\text{Т}} = [\text{CO}] + 500 \cdot [\text{NO}_x] + 50 \cdot [\text{C}_n\text{H}_m], \qquad (14)$$

где $500 = (\frac{\text{ПДК}_{\text{CO}}}{\text{ПДК}_{\text{NO}_x}})$ и $50 = (\frac{\text{ПДК}_{\text{CO}}}{\text{ПДК}_{\text{C}_n\text{H}_m}})$ – веса, отвечающие степени токсичности NO_x и C_nH_m по отношению к CO. Результаты такого расчета для $\beta = 0$ приведены на рис. 4.

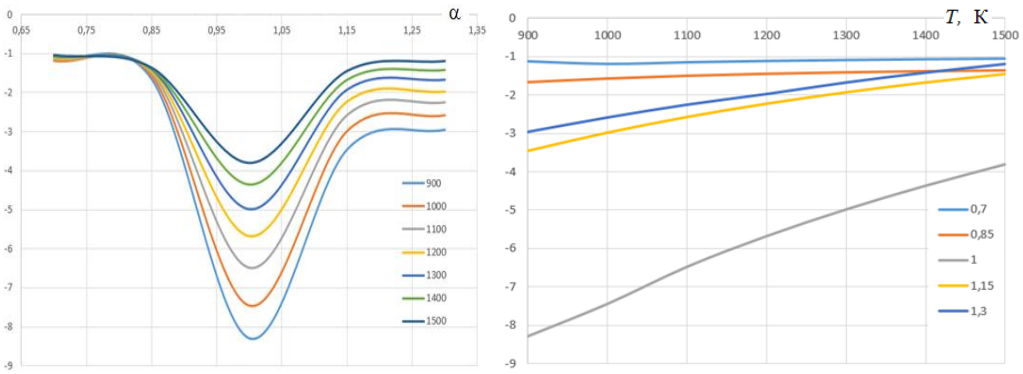


Рис. 4. Зависимость токсичности ДГ от коэффициента избытка воздуха α (слева) и температуры T (справа) при $\beta = 0$: на оси ординат приведен lgR_T согласно (14)

Поскольку каждое сочетание параметров T и α требует трудоёмкого расчета, целесообразно результаты рис. 4 представить в виде аппроксимирующей формулы:

$$R_{\mathrm{T}}(\alpha, T) = -\frac{\frac{1.26\cdot10^{8}}{T^{2.44}}}{\cosh(21.5\cdot\alpha-21.3)} - 1.08 - \left(\frac{1.34\cdot10^{7}}{T^{2.44}}\right)\cdot \mathrm{th}(21.5\cdot\alpha - 21.3). \qquad (15)$$

Структура (15) выбрана согласно форме сечений $R_{\mathrm{T}}(\alpha, T)$, отображенных на рис. 2, а значения подгоночных коэффициентов рассчитаны путем решения оптимизационной задачи.

Погрешность аппроксимации (15) оценивалась по трем показателям: корреляции рассчитываемых данных с исходными, по среднеквадратичной и максимальной относительной погрешности. Корреляция модели (15) и исходных данных составляет 0,99, среднеквадратичная относительная погрешность 6 %, а максимальная относительная погрешность – 24 %. Распределение погрешности по полигону экспериментального изучения процесса показано на рис. 5. При переходе к естественным (не логарифмическим) переменным это означает, что средняя погрешность аппроксимации составляет 17%, а максимальная – 70 %. Поэтому для обобщения на три переменные $R_{\mathrm{T}}(\alpha, \beta, T)$ и параметрической оптимизации рабочего процесса ГУ аппроксимация (15) не представляется достаточно надежной.

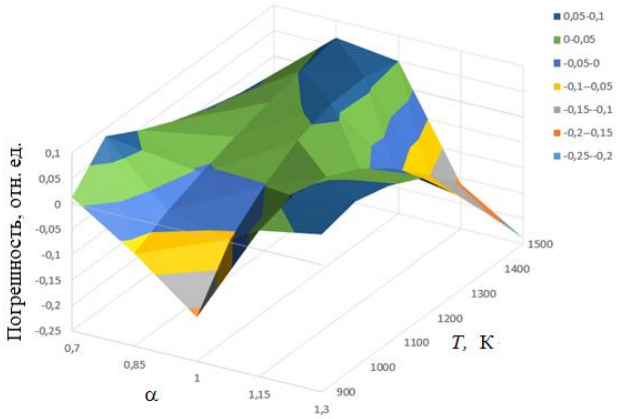


Рис. 5. Погрешность модели (15) применительно к данным расчета рис. 3 ($\beta = 0$)

Перспективным способом снижения токсичности ДГ разрабатываемого в ДГТУ ГУ представляется добавление к топливно-воздушной смеси перегретого пара в количестве от 0 до 30 % (по массе) относительно количества подаваемого топлива. Указанный диапазон ограничен экономическими и технологическими соображениями. В то же время не известно,

какое количество пара обеспечит максимальную экологическую чистоту устройства. Авторы выполнили сценарные расчеты с имитацией подачи пара в количестве $\beta = 0$, 10, 20 и 30 массовых процентов. Полученные в результате зависимости $R_{\mathrm{T}}(\alpha, \beta, T)$ табулированы и позволяют определять токсичность ДГ при произвольном сочетании α, β и T.

Техника интерполяции расчетных данных. Представим рассчитанные нами таблицы токсичности ДГ как трехмерное дискретное множество аргумента $T \otimes \alpha \otimes \beta$, где $T = \{T_i\}$, $i = 1, \dots I\ ,\ I = 7,\quad \alpha = \{\alpha_j\},\ j = 1, \dots J,\ J = 5,\ \beta = \{\beta_k\},\ k = 1, \dots K,\ K = 4$, которому соответствует дискретное множество коэффициента токсичности ДГ $\{\varepsilon_{ijk}\}$: $\varepsilon_{ijk} = \varepsilon(T_i, \alpha_j, \beta_{\mathrm{k}})$. Таким образом, расчетная область разбивается на параллелепипеды с главной диагональю $T_i \to T_{i+1},\ \alpha_j \to \alpha_{j+1},\ \beta_k \to \beta_{k+1}$.

Если считать функцию ε_{ijk} непрерывной и дифференцируемой по всем аргументам (это подтверждено вычислениями), то для набора параметров $(T, \alpha, \beta)^{\mathrm{T}}$, попадающих в ячейку трехмерной таблицы с номером $(i, j, k)^{\mathrm{T}}$ справедливо соотношение:

$$\varepsilon((T, \alpha, \beta)^{\mathrm{T}}) = \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^{\mathrm{T}}) + \frac{\varepsilon((T_{i+1}, \alpha_j, \beta_k)^{\mathrm{T}}) - \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^{\mathrm{T}})}{T_{i+1} - T_i} \cdot (T - T_i) +$$
$$+ \frac{\varepsilon((T_i, \alpha_{j+1}, \beta_k)^{\mathrm{T}} - \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^{\mathrm{T}}}{\alpha_{j+1} - \alpha_j} \cdot (\alpha - \alpha_j) + \frac{\varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_{k+1})^{\mathrm{T}} - \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^{\mathrm{T}}}{\beta_{k+1} - \beta_k} \cdot (\beta - \beta_k)\ . \qquad (16)$$

Формулу (13) можно рассматривать как интерполяционный многочлен или же разложение функции $\varepsilon_{ijk}((T, \alpha, \beta)^{\mathrm{T}})$ в ряд Тейлора. Ее применение к расчетным таблицам токсичности дает таблицы с частными производными $\varepsilon_T((T_i, \alpha_j, \beta_k)^{\mathrm{T}}) = \frac{\varepsilon((T_{i+1}, \alpha_j, \beta_k)^{\mathrm{T}}) - \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^{\mathrm{T}})}{T_{i+1} - T_i}$, $\varepsilon_\alpha((T_i, \alpha_j, \beta_k)^{\mathrm{T}}) = \frac{\varepsilon((T_i, \alpha_{j+1}, \beta_k)^{\mathrm{T}} - \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^{\mathrm{T}}}{\alpha_{j+1} - \alpha_j}$, $\varepsilon_\beta((T_i, \alpha_j, \beta_k)^{\mathrm{T}}) = \frac{\varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_{k+1})^{\mathrm{T}} - \varepsilon((T_i, \alpha_j, \beta_k)^{\mathrm{T}}}{\beta_{k+1} - \beta_k}$, что упрощает вычисления: алгоритм расчета интегральной токсичности ДГ сводится к поиску ячейки с номером $(i, j, k)^{\mathrm{T}}$, соответствующей набору $(T, \alpha, \beta)^{\mathrm{T}}$ и последующему применению формулы (16).

Сопоставление результатов расчета с данными экспериментальных измерений. Поскольку состав ДГ, управление рабочим процессом, стабилизация критичных параметров существенно зависят от установки назначения, исследование этих факторов требует проведения соответствующих испытаний. Однако данная программно-алгоритмическая разработка успешно использовалась при отработке опытных образцов ГУ. Поскольку доступные авторам газоанализаторы (АНКАТ-7664М и ПГА-М-31) позволяют определять состав газа, охлажденного до 60 °С и более, экспресс-анализу подвергались ДГ, смешавшиеся с окружающим воздухом до приемлемого охлаждения. Если считать, что ДГ покидают ГУ с температурой 1100-1200 °С, коэффициенты микропереноса массы, импульса и энергии совпадают, а токсичные компоненты CO, NO_x и C_nH_m не подверженными быстрой трансформации в атмосфере. В рамках принятых допущений при смешении ДГ с воздухом степень их охлаждения и разбавления (показаны на рис. 6) совпадают.

Практически выбирались три точки, удаленные от центра струи на срезе ГУ на ~ 2 м по горизонтали и на ~ 3 м по вертикали. Положение каждой выбиралось по показаниям помещенной в нее термопары (температура 60 °С). При температуре воздуха 24 °С и средней температуре ДГ на выходе ГУ 1000 °С это соответствует степени разбавления в ~ 60 раз. Таким образом, для оценки реального содержания вредных примесей в составе ДГ усредненное по трем точкам забора значение следует умножить на 60. Результаты приборного контроля состава ДГ приведены в табл. 2.

Как свидетельствуют результаты этих испытаний, увеличение подачи пара до 50% от подачи топлива несколько снижает токсичность и сажность дымовых газов. Однако ее разумное увеличение все же не позволяет сильно сократить подачу воздуха ниже уровня, диктуемого стехиометрией горения ДТ. При этом важно, что расчетная согласно предложенным моделям токсичность ДГ совпадает с измеренной в пределах множителя ~ 2. Расхождение объясняется как использованными допущениями, так и ограниченными возможностями технического эксперимента.

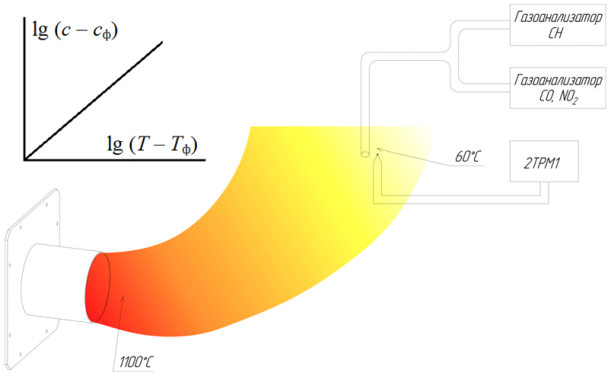


Рис. 6. Теоретическое обоснование (слева) и схема забора ДГ, разбавленных воздухом до T = 60 °C

Таблица 2

Результаты анализа ДГ и сажности при испытаниях опытного образца ГУ. Расход топлива – 11-18 кг/час, расход пара 1-9 кг/час

Параметр		[CO], %	[NO_x] = [NO_2], мг/м^3	[C_nH_m] = [CH_4] + [C_3H_8], %	Дымность (сажность)
Способ измерения		Анализатор ДГ АНКАТ-7664М	Анализатор ДГ АНКАТ-7664М	Анализатор ДГ ПГА-М-31	Визуальный контроль прозрачности
Расход топлива, кг/час	Расход пара, кг/час	Согласно ГОСТ 27824-2000 < 0,05 %	Согласно ГОСТ 27824-2000 < 290 мг/м3	Не нормируется ГОСТ 27824-2000	Согласно ГОСТ 27824-2000 Сажевое число < 2 по шкале Бахараха
11	1	не обнаружен	180	не обнаружен	не фиксируется
11	3	не обнаружен	120	не обнаружен	не фиксируется
11	5	не обнаружен	90	не обнаружен	не фиксируется
18	2	0,12	не измерялись	0,3	заметна
18	6	0,12	не измерялись	0,2	заметна
18	9	0,09	не измерялись	0,15	незначительна

Заключение. Сконструирована математическая модель токсичности ДГ жидкотопливного ГУ с комбинированной интенсификацией рабочего процесса. Рассчитаны коэффициенты, позволяющие оценивать токсичность ДГ во всем диапазоне эксплуатационных параметров. Проведены сценарные вычислительные эксперименты, их результаты согласуются с данными экспериментальных измерений. Термохимические расчеты и испытания опытного образца ГУ показали, что добавление водяного пара и реактивной плазмы в топливно-воздушную смесь в целом интенсифицирует и одновременно гомогенизирует горение. Как следствие доля несгоревшего топлива (углеводороды) и продуктов неполного сгорания (угарный газ) снижается. Также пар и плазма флегматизируют образование сажи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ануфриев И.С.* Экспериментальное исследование процессов при сжигании жидких углеводородов в горелочных устройствах с подачей перегретого водяного пара: дисс. … д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2019. – 254 с.
2. ГОСТ 27824-2000. Горелки промышленные на жидком топливе. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.

3. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. – М.: Изд-во стандартов, 2021. – 11 с.
4. Физико-химическое моделирование на ЭВМ. – https://studopedia.ru/5_119991_fiziko-himicheskoe-modelirovanie-na-evm.html.
5. *Алемасов В.Е., Тишин А.П., Дрегалин А.Ф.* Общий математический метод расчета и исследования горения при высокой температуре // Физика горения и взрыва. – 1971. – Т. 7, № 1. – С. 77-84.
6. *Белов Г.В., Трусов Б.Г.* Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
7. *Belov G.* On linear programming approach for the calculation of chemical equilibrium in complex thermodynamic systems // J. Math. Chem. – 2010. – Vol. 47, № 1. – Art. 446. – https://doi.org/10.1007/s10910-009-9580-y.
8. *Щетинков Е.С.* Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 739 с.
9. *Степанов Н.Ф., Ерлыкина М.Е., Филиппов Г.Г.* Методы линейной алгебры в физической химии. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 360 с.
10. *Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р.* Горение: Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ: пер. с англ. – М.: Физматлит, 2003. – 352 с.
11. *Потапов А.В.* Химическое равновесие многотемпературных систем // Теплофизика высоких температур. – 1966. – Т. 4, № 1. – С. 55-58.
12. *Петрусёв А.С.* Переобуславливание химических источников в уравнениях типа диффузия – конвекция – химическая кинетика // Математическое моделирование. – 2019. – Т. 31, № 5. – С. 56-68.
13. *Сон К.Э.* редуцирование полной системы уравнений химической кинетики для течений многокомпонентных высокотемпературных газов на основе метода частичного локального равновесия // Теплофизика высоких температур. – 2020. – Т. 58, № 1. – С. 81-90.
14. *Говорухин В.Н., Цибулин В.Г.* Компьютер в математическом исследовании: Maple, MATLAB, LaTeX: учебный курс. – СПб: "Питер", 2001. – 642 с.
15. *Дьяконов В.П.* Mathcad 8-12 для студентов. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 588 с.
16. *Азимова Н.Н., Бараниченко В.В., Ладоша Е.Н. и др.* Алгоритм выявления химизма и ведущие химические реакции в горелках, использующих углеводородные и спиртовые топлива // Навигатор в мире науки и образования. – 2023. – № 01 (58)'. Свид-во о рег-ции ОФЭРНиО 25103 от 28.02.2023 г.
17. *Mascitti V.R.* A simplified equilibrium hydrocarbon-air combustion gas model for use in air-breathing engine cycle computer programs / NASA TN D-4747. – 1968. – 47 p.
18. *Stull D., Prophet H.* JANAF Thermochemical Tables, second edition. – National Institute of Standards and Technology, 1971. – 1139 p.
19. *Gordon S., McBride B.J.* Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equi-librium Compositions and Applications: I. Analysis / NASA Reference Publication 1311. – 1994.
20. *McBride B.J., Gordon S.* Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications: II. Users Manual and Program Description / NASA Reference Publication 1311. – 1996.

REFERENCES

1. *Anufriev I.S.* Eksperimental'noe issledovanie protsessov pri szhiganii zhidkikh uglevodorodov v gorelochnykh ustroystvakh s podachey peregretogo vodyanogo para: diss. … d-ra tekhn. nauk [Experimental study of processes during combustion of liquid hydrocarbons in burner devices with the supply of superheated water vapor: dr. of eng. sc. diss.]. Novosibirsk, 2019, 254 p.
2. GOST 27824-2000. Gorelki promyshlennye na zhidkom toplive. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [GOST 27824-2000. Industrial burners on liquid fuel. General technical requirements]. Moscow: Izd-vo standartov, 2002, 12 p.
3. GOST R 57700.37-2021. Komp'yuternye modeli i modelirovanie. TSifrovye dvoyniki izdeliy [GOST R 57700.37-2021. Computer models and modeling. Digital twins of products]. Moscow: Izd-vo standartov, 2021, 11 p.
4. Fiziko-khimicheskoe modelirovanie na EVM [Physicochemical modeling on a computer]. Available at: https://studopedia.ru/ 5_119991_fiziko-himicheskoe-modelirovanie-na-evm.html.
5. *Alemasov V.E., Tishin A.P., Dregalin A.F.* Obshchiy matematicheskiy metod rascheta i issledovaniya goreniya pri vysokoy temperature [General mathematical method for calculating and studying combustion at high temperatures], *Fizika goreniya i vzryva* [Physics of Combustion and Explosion], 1971, Vol. 7, No. 1, pp. 77-84.
6. *Belov G.V., Trusov B.G.* Termodinamicheskoe modelirovanie khimicheski reagiruyushchikh system [Thermodynamic modeling of chemically reacting systems]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2013.

7. *Belov G.* On linear programming approach for the calculation of chemical equilibrium in complex thermodynamic systems, *J. Math. Chem.*, 2010, Vol. 47, No. 1, Art. 446. Available at: https://doi.org/10.1007/s10910-009-9580-y.
8. *Shchetinkov E.S.* Fizika goreniya gazov [Physics of gas combustion]. Moscow: Nauka, 1965, 739 p.
9. *Stepanov N.F., Erlykina M.E., Filippov G.G.* Metody lineynoy algebry v fizicheskoy khimii [Methods of linear algebra in physical chemistry]. Moscow: Izd-vo MGU, 1976, 360 p.
10. *Varnatts Yu., Maas U., Dibbl R.* Gorenie: Fizicheskie i khimicheskie aspekty, modelirovanie, eksperimenty, obrazovanie zagryaznyayushchikh veshchestv [Combustion: physical and chemical aspects, modeling, experiments, formation of pollutants]: transl. from engl. Moscow: Fizmatlit, 2003, 352 p.
11. *Potapov A.V.* Khimicheskoe ravnovesie mnogotemperaturnykh sistem [Chemical equilibrium of multitemperature systems], *Teplofizika vysokikh temperature* [High Temperature Thermophysics], 1966, Vol. 4, No. 1, pp. 55-58.
12. *Petrusev A.S.* Pereobuslavlivanie khimicheskikh istochnikov v uravneniyakh tipa diffuziya – konvektsiya – khimicheskaya kinetika [Preconditioning of chemical sources in diffusion-convection-chemical kinetics equations], *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modeling], 2019, Vol. 31, No. 5, pp. 56-68.
13. *Son K.E.* redutsirovanie polnoy sistemy uravneniy khimicheskoy kinetiki dlya techeniy mnogokomponentnykh vysokotemperaturnykh gazov na osnove metoda chastichnogo lokal'nogo ravnovesiya [Reduction of the complete system of chemical kinetics equations for multicomponent high-temperature gas flows based on the partial local equilibrium method], *Teplofizika vysokikh temperature* [High Temperature Thermal Physics], 2020, Vol. 58, No. 1, pp. 81-90.
14. *Govorukhin V.N., Tsibulin V.G.* Komp'yuter v matematicheskom issledovanii: Maple, MATLAB, LaTeX: uchebnyy kurs [Computer in mathematical research: Maple, MATLAB, LaTeX: training course]. Saint Petersburg: "Piter", 2001, 642 p.
15. *D'yakonov V.P.* Mathcad 8-12 dlya studentov [Mathcad 8-12 for students]. Moscow: Solon-Press, 2005, 588 p.
16. *Azimova N.N., Baranichenko V.V., Ladosha E.N. i dr.* Algoritm vyyavleniya khimizma i vedushchie khimicheskie reaktsii v gorelkakh, ispol'zuyushchikh uglevodorodnye i spirtovye topliva [Algorithm for identifying chemistry and leading chemical reactions in burners using hydrocarbon and alcohol fuels], *Navigator v mire nauki i obrazovaniya* [Navigator in the world of science and education], 2023, No. 01 (58)'. Certificate of registration OFERNiO 25103 dated 02/28/2023.
17. *Mascitti V.R.* A simplified equilibrium hydrocarbon-air combustion gas model for use in air-breathing engine cycle computer programs, NASA TN D-4747, 1968, 47 p.
18. *Stull D., Prophet H.* JANAF Thermochemical Tables, second edition. National Institute of Standards and Technology, 1971, 1139 p.
19. *Gordon S., McBride B.J.* Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equi-librium Compositions and Applications: I. Analysis, NASA Reference Publication 1311, 1994.
20. *McBride B.J., Gordon S.* Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications: II. Users Manual and Program Description, NASA Reference Publication 1311, 1996.

Богданец Диана Андреевна – Донской государственный технический университет; e-mail: bogdanets.diana@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра прикладной математики; студент.

Грищенко Вячеслав Игоревич – Донской государственный технический университет; e-mail: vgritshenko@donstu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра гидравлики, гидропневмоавтоматики и тепловых процессов; к.т.н.; доцент.

Калмыкова Ксения Федоровна – Донской государственный технический университет; e-mail: kfkalmykova@donstu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра электротехники и электроники; аспирант.

Рахманов Арслан Икрамович – Донской государственный технический университет; e-mail: ikramowic55@gmail.com; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра проектирования и технического сервиса транспортно-технологических систем; студент.

Цымбалов Денис Сергеевич – Донской государственный технический университет; e-mail: dcymbalov@donstu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра электроники и электротехники; старший преподаватель.

Bogdanets Diana Andreevna – Don State Technical University; e-mail: bogdanets.diana@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Applied Mathematics; student.

Grishchenko Vyacheslav Igorevich – Don State Technical University; e-mail: vgritshenko@donstu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Hydraulics, Hydropneumatic Automation and Thermal Processes; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kalmykova Ksenia Fedorovna – Don State Technical University; e-mail: kfkalmykova@donstu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Electrical Engineering and Electronics; postgraduate.

Rakhmanov Arslan Ikramovich – Don State Technical University; e-mail: ikramowic55@gmail.com; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Design and Technical Service of Transport and Technological Systems; student.

Tsymbalov Denis Sergeevich – Don State Technical University; e-mail: dcymbalov@donstu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the Department of Electronics and Electrical Engineering; senior lecturer.

УДК 621.374.33 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-201-211

А.Ю. Звягин, К.А. Бойков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ МЕТОДА АКТИВНОЙ РАДИОСЕНСОРНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Представлены результаты разработки и экспериментального исследования двух конструкций безэховых камер, предназначенных для активной радиосенсорной технической диагностики (АРТД). Цель работы заключалась в создании условий для получения достоверного сигнального радиопрофиля (СРП) исследуемого объекта с минимальными искажениями за счет эффективного подавления внешних электромагнитных наводок и отражений. В рамках исследования были реализованы две конфигурации экранированных объемов: первая – на основе многослойной фольгированной отражающей структуры, вторая – с использованием высококачественной ткани Фарадея. Проведено сравнительно оценочное тестирование эффективности экранирования при разных состояниях СВЧ элемента. Состояние СВЧ элемента менялось за счёт изменения схемы СВЧ смесителя, путем выпаивания ключевых элементов. Для верификации функциональных характеристик выполнены серии измерений с помощью зондирования поверхности исследуемого СВЧ-смесителя сверкороткими импульсами (СКИ). Получаемый СРП регистрировался с помощью осциллографа и принимающей антенны. Для обработки результатов использовался корреляционный анализ Пирсона, который показал свою эффективность в количественной оценке различий СРП объекта в исправном и дефектном состояниях. Полученные экспериментальные данные позволили оценить качество и перспективы материалов по ключевым параметрам: степень подавления паразитных сигналов, устойчивость к внешним помехам в различных условиях эксплуатации, механическая долговечность при циклических нагрузках и экономическая целесообразность реализации с учетом себестоимости материалов и трудоемкости сборки. Результаты исследования демонстрируют практическую применимость обеих конструкций в задачах прецизионных радиоизмерений, при этом выбор конкретного материала определяется оптимальным компромиссом между стоимостью производства, эксплуатационными характеристиками в различных климатических условиях и требуемым уровнем экранирования для конкретного применения. Полученные данные могут быть успешно использованы при проектировании как стационарных лабораторных комплексов, так и мобильных систем АРТД в условиях ограниченных ресурсов, включая полевые измерения и промышленный мониторинг. Исследования показали перспективность обоих подходов для достижения максимальных характеристик экранирования в широком частотном диапазоне.

Безэховая камера; активная радиосенсорная диагностика; ткань Фарадея; фольгированные поглотители; радиопрофиль; коэффициент экранирования.

A.Y. Zvyagin, K.A. Boikov

EXPERIMENTAL FACILITY BASED ON ANECHOIC CHAMBER FOR ACTIVE RADIOSENSORY TECHNICAL DIAGNOSTICS

The article presents the results of the development and experimental study of two designs of anechoic chambers designed for active radiosensory technical diagnostics (ARTD). The aim of the work was to create conditions for obtaining a reliable radio signal profile (SRP) of the object under study with minimal distortion due to the effective suppression of external electromagnetic interference and reflections. As part

of the study, two configurations of shielded volumes were implemented: the first based on a multilayer foil reflective structure, the second using high-quality Faraday fabric. Comparative evaluation testing of the shielding efficiency was carried out at different states of the microwave element. The state of the microwave element was changed by changing the scheme of the microwave mixer, by soldering out key elements. To verify the functional characteristics, a series of measurements were performed by probing the surface of the microwave mixer under study with short pulses (SP). The resulting SRP was recorded using an oscilloscope and a receiving antenna. Pearson correlation analysis was used to process the results, which proved effective in quantifying the differences in the SRP of an object in good and defective conditions. The experimental data obtained made it possible to evaluate the quality and prospects of materials based on key parameters: the degree of suppression of parasitic signals, resistance to external interference in various operating conditions, mechanical durability under cyclic loads, and the economic feasibility of implementation, taking into account the cost of materials and the complexity of assembly. The results of the study demonstrate the practical applicability of both designs in precision radio measurement tasks, while the choice of a specific material is determined by an optimal compromise between production costs, performance characteristics in various climatic conditions and the required level of shielding for a specific application. The data obtained can be successfully used in the design of both stationary laboratory complexes and mobile ARTD systems in conditions of limited resources, including field measurements and industrial monitoring. Studies have shown the promise of both approaches to achieve maximum shielding characteristics over a wide frequency range.

Anechoic chamber; active radiosensory technical diagnostics; Faraday fabric; foil absorbers; radio profile; shielding coefficient.

Введение. Метод активной радиосенсорной технической диагностики (АРТД) представляет собой перспективное направление в области контроля технического состояния электронных средств (ЭС), позволяя выявлять дефекты и отклонения в их функционировании без необходимости демонтажа или физического контакта [1–3]. Однако одной из ключевых проблем, ограничивающих широкое внедрение АРТД на практике, является сложность точной идентификации радиопрофиля исследуемого объекта. Эта проблема обусловлена высокой чувствительностью используемых в АРТД широкополосных антенн к внешним и внутренним электромагнитным помехам, которые существенно искажают полезный сигнал.

Помехи различной природы – как стационарные, так и случайные – создают фоновый шум, который маскирует информативные компоненты отражённого сигнала. Особенно остро эта задача стоит при диагностике сложных, многослойных устройств с миниатюрными элементами, где даже незначительные паразитные наводки могут привести к ложной интерпретации результатов. Это снижает достоверность диагностики и увеличивает вероятность ошибок особенно при определении наличия скрытых дефектов.

В предыдущих исследованиях было показано, что основными источниками искажений являются паразитные отражения от конструктивных элементов измерительного оборудования, взаимные наводки между антеннами и внешние электромагнитные поля промышленного происхождения [4]. Для борьбы с этими явлениями применяются различные методы: аппаратная фильтрация сигналов, пространственно-временная обработка, адаптивная компенсация помех, а также алгоритмические подходы, включая использование методов машинного обучения для повышения разрешающей способности диагностики. Однако данные методы зачастую оказываются недостаточны для обеспечения требуемой точности, особенно в условиях реального окружения с переменным уровнем электромагнитного фона.

Одним из наиболее эффективных путей решения этой проблемы является организация контролируемой электромагнитной среды, в которой проводятся измерения. В связи с этим актуальным становится проектирование специализированных безэховых камер [5–7], предназначенных для минимизации уровня внешних помех и подавления паразитных отражений. Такие камеры позволяют создать условия, максимально приближенные к свободному пространству распространения электромагнитных волн, тем самым улучшая качество регистрации отклика исследуемого образца.

В настоящей работе представлено решение по созданию и экспериментальной апробации двух типов безэховых камер, ориентированных на применение в системах АРТД. Особое внимание уделено выбору материалов поглощающих конструкций и оцен-

ке их эффективности в различных частотных диапазонах. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшей разработке измерительных комплексов, обеспечивающих высокую воспроизводимость и точность диагностики в условиях ограниченных ресурсов.

Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация геометрии и состава поглощающих покрытий для расширения рабочего частотного диапазона, а также разработка новых композитных материалов, сочетающих высокую эффективность поглощения с технологичностью изготовления и экономической целесообразностью применения [8].

Электромагнитное излучение в различных средах и его роль в системах АРТД. При пересечении границы раздела между двумя средами с различными электромагнитными свойствами происходит частичное отражение волны согласно законам Френеля, преломление – в соответствии с законом Снеллиуса, а также поглощение части энергии, сопровождающееся выделением тепла. Особое поведение наблюдается при взаимодействии электромагнитных излучений (ЭМИ) с проводящими материалами, например, металлами. Благодаря наличию свободных электронов, такие материалы эффективно экранируют внешние поля: под действием падающей волны в них возникают токи, генерирующие вторичное поле, компенсирующее внешнее. В результате электромагнитная волна практически не проникает внутрь проводника, а отражается от его поверхности – это явление лежит в основе принципа электромагнитного экранирования.

В контексте АРТД особую важность представляет процесс распространения сигналов внутри экранированного объема – такой как безэховая камера или экранирующая коробка. При работе широкополосной антенны формируется волновой импульс, содержащий широкий спектр частот. Этот сигнал распространяется в ограниченном пространстве, сталкиваясь с внутренними поверхностями конструкции, где он может отражаться, рассеиваться или поглощаться материалом стенок [9]. Наличие паразитных отражений и неполного поглощения приводит к образованию остаточных эхосигналов, которые могут маскировать информативную составляющую, связанную с откликом исследуемого объекта.

Особенно чувствительна к таким эффектам система АРТД, поскольку задача заключается в регистрации изменений в радиопрофиле, обусловленных дефектами или неоднородностями структуры. Таким образом, эффективное подавление паразитных отражений и защита от внешних электромагнитных наводок становятся ключевыми факторами обеспечения высокой точности диагностики.

Безэховая камера, как было показано ранее, служит инструментом для создания контролируемой электромагнитной среды, максимально приближенной к идеальным условиям измерений. Одним из основных метрических параметров, характеризующих ее эффективность, является степень экранирования (Shielding Effectiveness, SE), которая определяет способность конструкции ослаблять внешние электромагнитные поля. Значение SE зависит от рабочей частоты сигнала, геометрии камеры, а также типа и толщины используемых поглощающих материалов [5, 10].

$$SE = 10\log_{10}(\frac{P_{\text{ВНЕШ}}}{P_{\text{ВНУТР}}}) = 20\log_{10}(\frac{E_{\text{ВНЕШ}}}{E_{\text{ВНУТР}}}), \quad (1)$$

где $P_{\text{ВНЕШ}}, E_{\text{ВНЕШ}}$ – мощность и напряженность поля до экранирования, $P_{\text{ВНУТР}}$, $E_{\text{ВНУТР}}$ – мощность и напряженность поля внутри экрана.

Обычно SE представляют через три основных критерия экранирования ЭМП – это отражение, поглощение и многократное отражение:

$$SE = R + A + M, \quad (2)$$

где R – потери на отражение, A – потери на поглощение, M – потери на многократные отражения. Чем выше SE, тем лучше экран блокирует волны:

$$\text{R} = 168 + 10\log_{10}(\frac{\sigma_r}{\mu_{rf}}). \quad (3)$$

$$A = 8{,}686 \cdot \frac{t}{\delta}. \quad (4)$$

$$M = 20 \log_{10}\left|1 - e^{-2t/\delta}\right|. \quad (5)$$

Материал для безэховой камеры. На основе анализа уравнений (2–5), описывающих взаимодействие электромагнитного поля с материалами, были определены и обоснованы основные материалы, применимые при создании безэховой камеры. Эти уравнения учитывают такие параметры, как коэффициент отражения, поглощения и проницаемости материалов в зависимости от частоты электромагнитного излучения.

При разработке экранирующей камеры важно было подобрать материалы, сочетающие механическую прочность с эффективной защитой от электромагнитных помех. В качестве основы выбран полиэстирол – легкий и экономичный полимер с отличными изолирующими свойствами. Благодаря этому удалось создать прочный каркас, который не нарушает работу экранирующего слоя. В качестве одного из ключевых материалов для экранирования выбрано фольгированное покрытие, характеризующееся высокой электрической проводимостью σ, что обеспечивает значительный коэффициент отражения электромагнитных волн на границе раздела сред. Для идеального проводника коэффициент отражения по напряжённости электрического поля определяется выражением:

$$K = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (6)$$

где Z_1 и Z_2 – волновые сопротивления первой и второй сред соответственно. В случае металлической поверхности ($\sigma \to \infty$) $Z_2 \to 0$, что приводит к $K \approx -1$, т.е. практически полному отражению падающей волны.

Фольгированные покрытия применяются в стелс-технологиях благодаря своей способности к управляемому переотражению электромагнитной энергии в широком диапазоне частот. Это позволяет минимизировать уровень вторичного излучения, регистрируемого внешними радиолокационными системами [11].

Вторым перспективным материалом для использования в АРТД является ткань Фарадея (ФТ), представляющая собой композитный экранирующий материал со сложной многослойной структурой. Ее поведение в электромагнитном поле описывается через комплексную относительную диэлектрическую проницаемость:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (7)$$

и магнитную проницаемость:

$$\mu^* = \mu' - j\mu'', \quad (8)$$

где действительные части ε' и μ' характеризуют способность материала хранить энергию электромагнитного поля, а мнимые части ε'' и μ'' – степень диссипации энергии, связанной с потерями в материале.

Проникающая в такой материал электромагнитная волна подвергается экспоненциальному затуханию, которое описывается коэффициентом затухания α:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1\right)}, \quad (9)$$

где ω – угловая частота, σ – удельная проводимость материала.

Это приводит к уменьшению интенсивности переотраженных сигналов и снижению уровня паразитных помех, что особенно важно при восстановлении радиопрофиля объекта диагностики [12, 13].

Процесс распространения электромагнитного излучения внутри экранированной области безэховой камеры при проведении АРТД определяется совокупностью факторов:

- электрофизическими характеристиками материалов (проводимость σ, комплексная диэлектрическая ε^* и магнитная μ^* проницаемости);
- геометрией объема;
- спектральным составом зондирующего сигнала;
- наличием исследуемого образца, который вносит дополнительные возмущения в распределение электромагнитного поля.

Математически изменение поля можно описать с помощью уравнений Максвелла.

Адаптация и тонкая настройка указанных параметров играют ключевую роль в минимизации уровня шумов и интерференционных эффектов, обеспечивая тем самым высокую точность и воспроизводимость результатов диагностики. Эти аспекты имеют принципиальное значение для успешного внедрения метода АРТД в практику технической диагностики.

АРТД в безэховой камере. Для оценки влияния экранирования безэховой камеры на эффективность АРТД была разработана и реализована измерительная установка, включающая сигнал-генератор, осциллограф, а также пару направленных антенн – передающую и приёмную, между которыми размещался исследуемый образец (рис. 1).

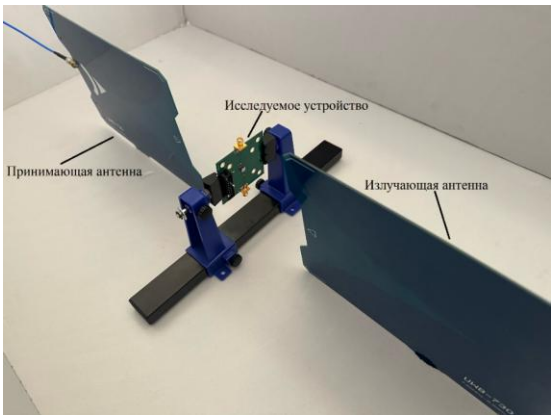


Рис. 1. Измерительная установка в безэховой камере

В качестве объекта исследования выбран СВЧ-смеситель с установленным SMD-компонентом на печатной плате. Проводилось измерение СРП устройства до и после демонтажа указанного компонента (рис. 2), что позволило оценить изменение электромагнитного отклика при наличии и отсутствии элемента.

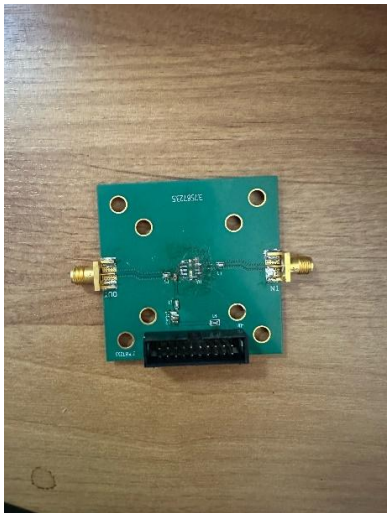


Рис. 2. СВЧ усилитель с выпаянным SMD компонентом

Исследование выполнялось с использованием двух типов экранирующих покрытий [14] с целью сравнительной оценки их эффективности в условиях АРТД. Для обеспечения достоверности полученных данных проведено значительное количество измерений (не менее 20–30 циклов для каждого случая) в строго контролируемых лабораторных услови-

ях. Все эксперименты были повторными, с фиксированным положением антенн, стабильными температурой и влажностью окружающей среды, а также неизменными настройками измерительных приборов, что обеспечивало воспроизводимость результатов.

Для обработки экспериментальных данных применялся метод корреляционного анализа Пирсона, позволивший выявить статистически значимые различия между СРП исправного и дефектного состояний исследуемого объекта (СВЧ-смесителя). Было проведено около ~100 измерений, при которых средний коэффициент кореляции между импульсами по одному устройству составляет ~0,81, а при корреляционном анализе устройств с дефектом и без ~(0,35). Полученные результаты характеризуются высокой степенью повторяемости: относительный разброс данных составил не более 3–5%, что подтверждает устойчивость наблюдаемых диагностических признаков и их связь именно с наличием/отсутствием функционального элемента, а не со случайными шумами или вариациями параметров измерительной системы.

На зондируемый образец был подан сверкороткий импульс [15–17] длительностью 10 нс. На рис. 3 показан СРП исправного устройства в фольгированной безэховой камере.

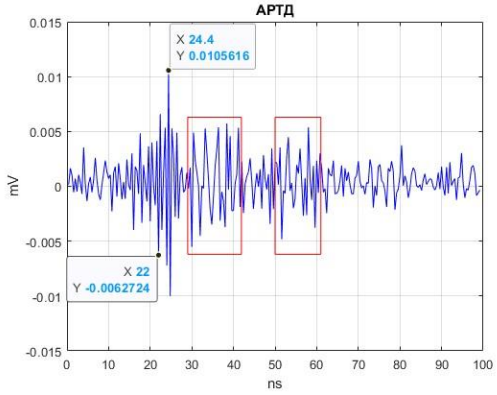


Рис. 3. СРП СВЧ усилителя в фольгированной камере

На графике наблюдается значительное переотражение импульса (области, выделенные красными прямоугольниками), что свидетельствует о высокой отражающей способности фольгированной поверхности и её низкой эффективности в поглощении ЭМИ в исследуемом частотном диапазоне. Фольга отражает основную долю падающей электромагнитной энергии, что приводит к возникновению не только первичного, но и множественных вторичных, а также последующих переотраженных сигналов.

Важно отметить, что характер и интенсивность этих переотражений тесно связаны с геометрическими размерами безэховой камеры. В частности, при соизмеримости линейных размеров внутреннего пространства камеры L с длиной волны зондирующего сигнала λ, возникают условия для формирования устойчивых стоячих волн и интерференционных максимумов:

$$L = n\frac{\lambda}{2},\ n = 1,2,3,\dots, \tag{10}$$

где n – целое число, определяющее порядок резонанса. Это выражение описывает условие образования стоячей волны между двумя параллельными поверхностями, разделенными расстоянием L. При выполнении этого условия внутри камеры формируются зоны усиления и ослабления электромагнитного поля, что дополнительно искажает регистрируемый СРП и снижает точность диагностики методом АРТД. Кроме того, согласно выражению (6), коэффициент отражения К от идеально проводящей поверхности (в случае фольги) близок к единице. Такой материал эффективен для внешнего экранирования, но плохо справляется с поглощением в АРТД.

Интенсивность повторных отражений может быть оценена через время задержки между ними:

$$\Delta t = \frac{2L}{c}, \tag{11}$$

где с – скорость света в вакууме.

При увеличении размера камеры временной интервал между отражениями возрастает, что позволяет их разрешить во времени, однако общий уровень фоновых помех остаётся высоким из-за слабого затухания сигнала при каждом отражении. Геометрия камеры играет ключевую роль в поведении электромагнитного поля внутри нее: увеличение объема помещения относительно длины волны позволяет снизить вероятность формирования стоячих волн и минимизировать влияние переотражений на результаты измерений.

Несмотря на переотраженный сигнал видны различия в СРП исправного и неисправного устройств (рис. 4). Основным отличием радиопрофиля неисправного устройства является разница в максимальной амплитуде сигнала, что влияет и на энергетику отраженного сигнала импульса. Когда из устройства удаляется SMD-усилитель, это напрямую влияет на амплитуды свободных составляющих СРП.

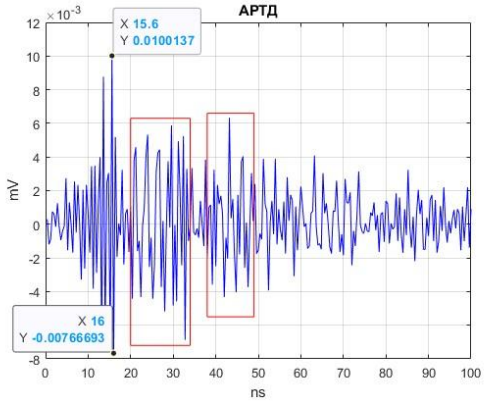


Рис. 4. СРП СВЧ усилителя без SMD компонента в фольгированной камере

В случае же с материалом ФТ переотражение импульса более сглажено, что соответствует высокой поглощающей способности материала (рис. 5). Амплитуда отраженного сигнала снижается на 30–40% по сравнению с фольгированной камерой. На временной развертке видно, что фронт отраженного сигнала менее выражен, а затухание происходит по экспоненциальному закону, что характерно для материалов с высокими потерями на поглощение. Это согласуется с теоретическими ожиданиями [18–20], поскольку материал ФТ имеет высокую диэлектрическую проницаемость ($\varepsilon' \approx 12–15$) и значительную мнимую часть ($\varepsilon'' \approx 3–5$), что обеспечивает сильное рассеивание энергии. Дополнительное ослабление сигнала может быть связано с пористой структурой материала, способствующей многократному внутреннему переотражению и последующему поглощению. Таким образом, материал ФТ демонстрирует лучшие поглощающие свойства по сравнению с обычной фольгой, что делает его потенциально более эффективным для применения в задачах, требующих снижения уровня переотражений и электромагнитных помех.

На рис. 6 представлен СРП усилителя с выпаянным SMD-компонентом, который, как и в случае фольгированной камеры демонстрирует характерное отличие по сравнению с СРП исправного устройства. Оно заключается в изменении амплитудно-временных характеристик отраженного сигнала. Так после удаления SMD-компонента наблюдается уменьшение амплитуды основного сигнала на 5-8%, что связано с изменением локального импеданса в месте расположения компонента. Так же стоит заметить, что за счет более эффективного поглощения и переотражения сигналов внутри ФТ-камеры амплитуда принимаемого сигнала оказывается выше, чем в обычной фольгированной камере, независимо от текущего состояния устройства.

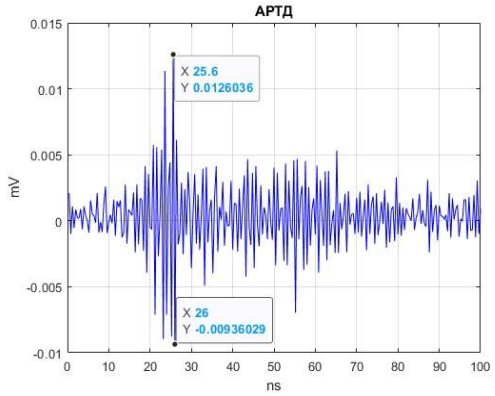


Рис. 5. СРП СВЧ усилителя в ФТ камере

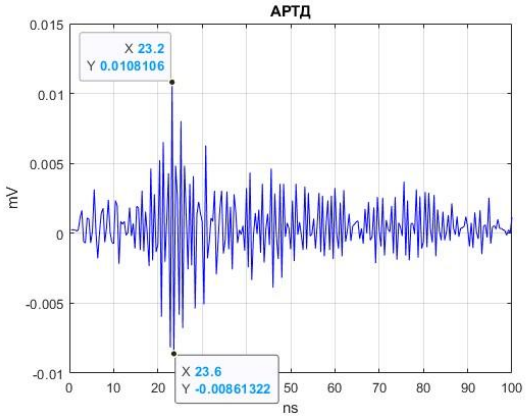


Рис. 6. СРП СВЧ усилителя с выпаянным SMD в ФТ камере

Полученные результаты могут быть полезны для адаптации экранирующих систем в радиотехнике, проектировании безэховых камер и других приложениях, где важно управление электромагнитными волнами.

За счет применения экранирования в безэховых камерах радиопрофиль исследуемого образца стал намного четче, поскольку экранирующие материалы (фольга и ФТ) эффективно подавили паразитные электромагнитные наводки и внешние помехи. В случае с фольгой, несмотря на сильное переотражение, проявились границы импульса и его временные характеристики, что позволило определить динамику взаимодействия радиоволн с поверхностью образца. Однако из-за множественных переотражений возникли искажения на поздних временных интервалах, затрудняющие анализ слабых сигналов.

При использовании материала ФТ радиопрофиль становится еще более детализированным, поскольку снижение уровня переотражений минимизировало наложение эхосигналов. Это особенно важно при исследовании образцов со сложной структурой или слабыми откликами, так как позволяет выделить даже незначительные особенности рассеяния и поглощения. Уменьшение фонового шума и вторичных отражений сделало сигнал чище, а значит, повысило точность измерений амплитуды, длительности и формы импульса.

Таким образом, экранирование не только позволило повысить соотношение сигнал/шум, но и более точно визуализировать СРП исследуемого образца, включая его геометрические особенности, распределение отражающих элементов и возможные аномалии рассеяния. Это особенно ценно для задач радиосенсорной диагностики где четкость радиопрофиля напрямую влияет на достоверность результатов.

Заключение. В ходе эксперимента был разработан и отлажен измерительный стенд для реализации АРТД, предназначенный для оценки СРП электронных устройств. Основное внимание было уделено сравнительному анализу двух типов экранирующих материалов – ткани Фарадея и фольгированного покрытия с точки зрения их влияния на качество регистрируемых сигналов и помехозащищённость измерений.

Экспериментальные данные показали, что использование ФТ обеспечивает более высокую стабильность и воспроизводимость результатов за счет эффективного поглощения паразитных отражений и снижения уровня внешних электромагнитных помех. Многослойная структура материала, сочетающая проводящие и диэлектрические элементы с потерями, способствует контролируемому затуханию электромагнитной волны в теле материала, что минимизирует интерференционные эффекты и сохраняет амплитудную целостность полезного сигнала. Таким образом, ФТ-ткань является предпочтительным материалом для применения в прецизионных измерениях методом АРТД, особенно при необходимости точного восстановления пространственного распределения электромагнитного поля объекта.

В то же время фольгированное покрытие продемонстрировало свою эффективность в задачах электромагнитной защиты, где главным критерием является подавление внешнего излучения. Высокая отражающая способность фольги позволяет экранировать внутреннее пространство от внешних воздействий. Однако из-за значительного переотражения внутри камеры ее применение требует строгого соблюдения геометрических условий – в частности, соотношения между длиной волны и размерами камеры чтобы минимизировать искажения сигнала. Следовательно, фольгированный экран может быть рекомендован в случаях, когда требуется общая электромагнитная изоляция, а не высокоточная диагностика.

Таким образом, выбор типа экранирующего материала должен основываться на функциональных требованиях к измерительной системе: если ключевыми являются точность, стабильность и воспроизводимость результатов, предпочтительно использовать ФТ-ткань. Если же необходима надежная защита от внешних электромагнитных наводок в крупногабаритных системах, фольга остается экономически и технически обоснованным решением. Оба материала обладают определенной спецификой применения, что подтверждает необходимость их индивидуального подхода при проектировании безэховых камер для АРТД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бойков К.А*. Радиосенсорная техническая диагностика сложного электронного узла // Сенсорные системы. – 2022. – Т. 36, № 3. – С. 252-261. – DOI: 10.31857/S0235009222030027. – EDN SESCKY.
2. *Бойков К.А.* Радиосенсорная аутентификация электронных устройств // Проектирование и технология электронных средств. – 2022. – № 2. – С. 19-25. – EDN INGPVX.
3. *Бойков К.А.* Радиосенсорная идентификация и аутентификация радиоэлектронных устройств // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2022. – Т. 16, № 5. – С. 15-20. – DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-5-15-20. – EDN XXHOJL.
4. *Бойков К.А., Звягин А.Ю.* Исследование сигнального радиопрофиля при активной радиосенсорной диагностике // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем ("Радиоинфоком-2024"): Сб. научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 18–22 ноября 2024 года. – М.: МИРЭА - Российский технологический университет, 2024. – С. 403-406. – EDN DALURT.
5. *Paul C.R., Scully R.C., Steffka M.A.* Introduction to electromagnetic compatibility. – John Wiley & Sons, 2022.
6. *Скулачев Д.П., Косов А.С.* Особенности применения металлизированной ткани для экранирования безэховой камеры // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – № 4.
7. *Латыпова А.Ф., Калинин Ю.Е.* Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // Вестник ВГТУ. – 2012. – № 6. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnyh-radiopogloschayuschih-materialov (дата обращения: 28.05.2025).
8. *Газизов Т.Р.* Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 256 с. – ISBN 5-91302-018-9. – EDN YTZTJD.

9. *Chung B.K., Chuah H.T.* Design and construction of a multipurpose wideband anechoic chamber // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2003. – Vol. 45, No. 6. – P. 41-47.
10. *Никольский В.В., Никольская Т.И.. Никольский В.В., Никольская Т.И.* Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие для студентов радиотехнических специальностей вузов. – 6-е. изд. – М.: Либроком, 2012. – 542 с. – ISBN 978-5-397-02973-5. – EDN QJZUGD.
11. *Лагарьков А.Н. и др.* Актуальные задачи стелс-технологий / Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН. – URL: http://www. itae. ru/science/topics/% E2.
12. *Насонова Н.В., Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Богуш В.А.* Пористые волокнистые материалы с жидкостными наполнителями для экранирования электромагнитного излучения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2004. – № 12. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/poristye-voloknistye-materialy-s-zhidkostnymi-napolnitelyami-dlya-ekranirovaniya-elektromagnitnogo-izlucheniya (дата обращения: 28.05.2025).
13. *Saito T.* Shielding performance of open-type magnetic shielding box structure // IEEE Transactions on Magnetics. – 2009. –Vol. 45, No. 10. – P. 4640-4643.
14. *Xu Q., Huang Y.* Anechoic and Reverberation Chambers: Theory, Design, and Measurements. – 2019.
15. *Усыченко В.Г., Усыченко А.С., Сорокин Л.Н.* Энергетические характеристики излучателей сверхкоротких электромагнитных импульсов // Известия вузов. Радиофизика. – 2015. – Т. 58, № 2. – С. 114-122.
16. *Елфимов А.Е. и др*. Перестраиваемый генератор СКИ с низким уровнем звона // VI научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2023. Физика и технические приложения волновых процессов ФиТПВП-2023: Матер. XX Международной научно-технической конференции. Казань, 22–24 ноября 2023 года. – 2023. – С. 192.
17. *Wentzloff D.D., Chandrakasan A.P.* Gaussian pulse generators for subbanded ultra-wideband transmitters // IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2006. – Vol. 54, No. 4. – P. 1647-1655.
18. *Periyasamy A.P. et al.* Effect of silanization on copper coated milife fabric with improved EMI shielding effectiveness // Materials Chemistry and Physics. – 2020. – Vol. 239. – P. 122008.
19. *Lara J.L., del Jesus M., Losada I.J.* Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures: Part II: Experimental validation // Coastal Engineering. – 2012. – Vol. 64. – P. 26-46.
20. *Pandey R., Tekumalla S., Gupta M.* EMI shielding of metals, alloys, and composites // Materials for potential EMI shielding applications. – Elsevier, 2020. – P. 341-355.

REFERENCES

1. *Boykov K.A.* Radiosensornaya tekhnicheskaya diagnostika slozhnogo elektronnogo uzla [Radiosensory technical diagnostics of a complex electronic node], *Sensornye sistemy* [Sensor systems], 2022, Vol. 36, No. 3, pp. 252-261. DOI: 10.31857/S0235009222030027. EDN SESCKY.
2. *Boykov K.A.* Radiosensornaya autentifikatsiya elektronnykh ustroystv [Radiosensory authentication of electronic devices], *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and technology of electronic means], 2022, No. 2, pp. 19-25. EDN INGPVX.
3. *Boykov K.A.* Radiosensornaya identifikatsiya i autentifikatsiya radioelektronnykh ustroystv [Radiosensory identification and authentication of radio-electronic devices], *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T–program comm: Telecommunications and transport], 2022, Vol. 16, No. 5, pp. 15-20. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-5-15-20. EDN XXHOJL.
4. *Boykov K.A., Zvyagin A.Yu.* Issledovanie signal'nogo radioprofilya pri aktivnoy radiosensornoy diagnostike [Research of the signal radio profile in active radiosensory diagnostics], *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya radiotekhnicheskikh i infokommunikatsionnykh sistem ("Radioinfokom-2024"): Sb. nauchnykh statey po materialam VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 18–22 noyabrya 2024 goda* [Actual problems and prospects of development of radio engineering and infocommunication systems (Radioinfocom-2024): Collection of scientific articles based on materials from the VIII International Scientific and Practical Conference, Moscow, November 18-22, 2024]. Moscow: MIREA - Rossiyskiy tekhnologicheskiy universitet, 2024, pp. 403-406. EDN DALURT.
5. *Paul C.R., Scully R.C., Steffka M.A.* Introduction to electromagnetic compatibility. John Wiley & Sons, 2022.
6. *Skulachev D.P., Kosov A.S.* Osobennosti primeneniya metallizirovannoy tkani dlya ekranirovaniya bezekhovoy kamery [Features of the use of metallized fabric for shielding an anechoic chamber], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics], 2023, No. 4.
7. *Latypova A.F., Kalinin Yu.E.* Analiz perspektivnykh radiopogloshchayushchikh materialov [Analysis of promising radio-absorbing materials], *Vestnik VGTU* [Bulletin of VSTU], 2012, No. 6. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-perspektivnyh-radiopogloschayuschih-materialov (accessed 28 May 2025).

8. *Gazizov T.R.* Elektromagnitnaya sovmestimost' i bezopasnost' radioelektronnoy apparatury [Electromagnetic compatibility and safety of electronic equipment]. Tomsk: TML-Press, 2007, 256 p. ISBN 5-91302-018-9. EDN YTZTJD.
9. *Chung B.K., Chuah H.T.* Design and construction of a multipurpose wideband anechoic chamber, *IEEE Antennas and Propagation Magazine,* 2003, Vol. 45, No. 6, pp. 41-47.
10. *Nikol'skiy V.V., Nikol'skaya T.I.. Nikol'skiy V.V., Nikol'skaya T.I.* Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln: ucheb. posobie dlya studentov radiotekhnicheskikh spetsial'nostey vuzov [Electrodynamics and radio wave propagation : a textbook for students of radio engineering specialties of universities]. 6th. ed. Moscow: Librokom, 2012, 542 p. ISBN 978-5-397-02973-5. – EDN QJZUGD.
11. *Lagar'kov A.N. i dr.* Aktual'nye zadachi stels-tekhnologiy [Current tasks of stealth technologies], Institute of Theoretical and Applied Electrodynamics of the Russian Academy of Sciences. Available at: http://www. itae. ru/science/topics/% E2.
12. *Nasonova N.V., Lyn'kov L.M., Borbot'ko T.V., Bogush V.A.* Poristye voloknistye materialy s zhidkostnymi napolnitelyami dlya ekranirovaniya elektromagnitnogo izlucheniya [Porous fibrous materials with liquid fillers for shielding electromagnetic radiation], *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Bulletin of Polotsk State University. Sergey B. Submission. Latest news], 2004, No. 12. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/poristye-voloknistye-materialy-s-zhidkostnymi-napolnitelyami-dlya-ekranirovaniya-elektromagnitnogo-izlucheniya (accessed 28 May 2025).
13. *Saito T.* Shielding performance of open-type magnetic shielding box structure, *IEEE Transactions on Magnetics,* 2009, Vol. 45, No. 10, pp. 4640-4643.
14. *Xu Q., Huang Y.* Anechoic and Reverberation Chambers: Theory, Design, and Measurements, 2019.
15. *Usychenko V.G., Usychenko A.S., Sorokin L.N.* Energeticheskie kharakteristiki izluchateley sverkhkorotkikh elektromagnitnykh impul'sov [Energy characteristics of ultrashort electromagnetic pulse emitters], *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Izvestiya vuzov. Radiophysics], 2015, Vol. 58, No. 2, pp. 114-122.
16. *Elfimov A.E. i dr.* Perestraivaemyy generator SKI s nizkim urovnem zvona [Tunable low-ringing SKI generator], *VI nauchnyy forum telekommunikatsii: teoriya i tekhnologii TTT-2023. Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov FiTPVP-2023: Mater. XX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Kazan', 22–24 noyabrya 2023 goda* [VI Scientific Forum of Telecommunications: Theory and Technologies TTT-2023. Physics and Technical Applications of Wave Processes FiTAVP-2023: Proc. XX International Scientific and Technical Conference. Kazan, November 22–24, 2023], 2023, pp. 192.
17. *Wentzloff D.D., Chandrakasan A.P.* Gaussian pulse generators for subbanded ultra-wideband transmitters, *IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques,* 2006, Vol. 54, No. 4, pp. 1647-1655.
18. *Periyasamy A.P. et al.* Effect of silanization on copper coated milife fabric with improved EMI shielding effectiveness, *Materials Chemistry and Physics,* 2020, Vol. 239, pp. 122008.
19. *Lara J.L., del Jesus M., Losada I.J.* Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures: Part II: Experimental validation, *Coastal Engineering,* 2012, Vol. 64, pp. 26-46.
20. *Pandey R., Tekumalla S., Gupta M.* EMI shielding of metals, alloys, and composites, *Materials for potential EMI shielding applications*. Elsevier, 2020, pp. 341-355.

Звягин Алексей Юрьевич – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: zvyagin@mirea.ru; г. Москва, Россия; кафедра радиоволновых процессов и технологий; аспирант.

Бойков Константин Анатольевич – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: nauchnyi@yandex.ru; г. Москва, Россия; кафедра радиоволновых процессов и технологий; д.т.н.

Zvyagin Alexey Yurevich – MIREA – Russian Technological University; e-mail: zvyagin@mirea.ru; Moscow, Russia; the department of radio wave processes and technologies; graduate student.

Boikov Konstantin Anatol'evich – MIREA – Russian Technological University; e-mail: nauchnyi@yandex.ru; Moscow, Russia; the department of radio wave processes and technologies; graduate student.

УДК 621.396.6 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-212-227

А.И. Рыбаков

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЭКВАЛАЙЗЕРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ В ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОЛИНИЯХ

Проблема повышения помехоустойчивости декаметровых радиолиний (ДКМ) в современных отечественных системах радиосвязи, включая коротковолновую (КВ) связь, остается значимой и востребованной, несмотря на наличие многочисленных классических исследований. В качестве объекта нашего анализа выбраны именно системы ДКМ радиосвязи. Конкретно, система Р-016, используемая в качестве прототипа, сталкивается с такими ограничениями, как диапазон частот, что сказывается на ее эффективности в условиях изменчивости ионосферных характеристик, негативно влияющих на уровень сигналов. Проблемы обработки сигналов в прототипах могут привести к возникновению битовых ошибок, достигающих уровня ошибок (BER) в 10^{-3}, даже при отсутствии значительных помех. Основная задача исследования заключается в оценке влияния различных факторов, таких как изменение длины преамбулы и внедрение адаптивных фильтров, на помехоустойчивость систем. Анализ результатов указывает на то, что увеличение длины преамбулы способствует улучшению помехоустойчивости декаметровых радиолиний. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности повышения помехоустойчивости существующих систем ДКМ радиосвязи, функционирующих в условиях варьирующихся ионосферных характеристик. В данной работе также рассматривается научно обоснованный выбор конфигурации эквалайзера для декаметровых радиолиний с целью увеличения дальности связи и улучшения помехоустойчивости. Разработанные методы обеспечивают научное обоснование эффективных настроек эквалайзера, что позволяет достигать максимальных показателей дальности. Для проверки различных конфигураций эквалайзера в условиях рэлеевского канала используется имитационное моделирование в среде Simulink, что подтверждает правильность выбранных параметров. Экспериментальная апробация модели ДКМ радиолинии включает исследование различных длин преамбул, а анализ отношений сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника позволяет адаптировать эти параметры. Таким образом, результаты исследования показывают, что увеличение длины преамбулы положительно сказывается на помехоустойчивости системы. Работа сосредоточена на моделировании и методах функционирования радиолиний ДКМ, а полученные результаты имеют практическое значение для активной адаптации существующих радиосистем в условиях изменяющейся ионосферы.

Дальнемагистральная система связи; отношение сигнал/шум; помехоустойчивость радиоканала; декаметровая радиосвязь; эквалайзер; преамбула; адаптивные фильтры.

A.I. Rybakov

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE EQUALIZER CONFIGURATION TO INCREASE NOISE IMMUNITY IN DECAMETER RADIO LINES

T*he problem of increasing the noise immunity of decameter radio lines (DRL) in modern domestic radio communication systems, including short-wave (SW) communication, remains significant and in demand, despite the existence of numerous classical studies. The decameter radio communication systems have been chosen as the object of our analysis. Specifically, the R-016 system, which is used as a prototype, faces limitations such as its frequency range, which affects its effectiveness in conditions of variable ionospheric characteristics that negatively impact the signal level. Signal processing issues in prototypes can lead to bit errors reaching a bit error rate (BER) of 10^{-3}, even in the absence of significant interference. The main objective of the study is to evaluate the impact of various factors, such as changing the length of the preamble and implementing adaptive filters, on the noise immunity of systems. The analysis of the results indicates that increasing the length of the preamble improves the noise immunity of decameter radio lines. The practical significance of the results is that they can be used to improve the noise immunity of existing DFM radio communication systems that operate in variable ionospheric conditions. This paper also discusses the scientific basis for selecting an equalizer configuration for decameter radio lines to increase communication range and improve noise immunity. The developed methods provide a scientific basis for selecting effective equalizer settings, which can lead to improved communication range. To test different equalizer configurations in a Rayleigh channel, Simulink simulation is used, which*

confirms the correctness of the selected parameters. Experimental validation of the decameter radio line model includes the study of various preamble lengths, and the analysis of signal-to-noise ratios (SNR) at the receiver input allows for the adaptation of these parameters. Thus, the research results show that increasing the preamble length has a positive impact on the system's noise immunity. The work focuses on the modeling and operation of DFM radio lines, and the obtained results have practical significance for the active adaptation of existing radio systems in a changing ionosphere.

Long-range communication system; signal-to-noise ratio; radio channel noise immunity; decameter radio communication; equalizer; perambulatory; adaptive filters.

Введение. Современные декаметровые линии радиосвязи сталкиваются с несколькими техническими недостатками, которые требуют комплексного подхода для адаптации параметров в зависимости от конкретных условий. Одной из основных проблем является непостоянство состояния ионосферы, что приводит к значительным колебаниям характеристик в диапазоне частот от 10 до 100 МГц. Это также усложняет точное прогнозирование этих характеристик на временной интервал, соответствующий предстоящему сеансу радиосвязи, который может длиться от нескольких часов до суток [1, 2]. Для решения этих проблем была разработана расчетная модель, которая позволяет определить мощность сигнала на входе приемника, основываясь на параметрах передающего и приемного оборудования, а также задаваемых характеристиках скоростной передачи, полосы частот и требуемого уровня ошибок (ОШ) передачи. Модель также помогает установить временной интервал, в течение которого возможно вести сеансы связи, а также тестировать применяемые адаптационные методы. Результаты расчетов показали, что необходимая мощность передатчика для достижения уровня BER не хуже 3×10^{-3} составляет примерно 10 Вт. Это значение обусловлено несколькими факторами. Во-первых, уровень BER в 3×10^{-3} считается допустимым для ряда радиокоммуникационных приложений, что позволяет достичь баланса между качеством передачи и мощностью передатчика в разрабатываемой модели. Во-вторых, мощность 10 Вт выбрана на основе анализа параметров ионосферного канала, включая шумы и затухания сигналов. Эта мощность обеспечивает наилучшие условия помехоустойчивости в заданных условиях. Возможно снижение мощности до 5 Вт, однако это приведет к уменьшению уровня принимаемого сигнала на входе демодулятора на 3 дБ.

Описание или постановка решаемой задачи. В условиях крайне высокой ионизации атмосферы декаметровые линии могут столкнуться с подобными трудностями, как и другие радиотехнические системы, однако они адаптируются и восстанавливаются значительно быстрее [3]. Тем не менее, надёжность таких линий может быть недостаточной из-за эффектов замирания сигнала при ионосферном распространении и наличия "молчащих зон", что может привести к значительным потерям информации, особенно если команды для крупной региональной системы передаются исключительно по декаметровым радиолиниям. В то же время, радиосвязь в ДКМ диапазоне, наряду со спутниковой связью, остаётся одним из средств межконтинентальной связи, предлагая экономичное решение для организации дальнего радиосвязи [4]. В отличие от этого, системы связи в микроволновых диапазонах эффективны только при одновременной передаче сотен и даже тысяч телефонных каналов.

В рамках модели рассчитываются точки отражения как от ионосферы, так и от поверхности Земли. После определения точек отражения происходит импорт данных с прогнозами (статистические данные модели IRI - International Reference Ionosphere) или фактических данных с ионозонда о критических частотах. Из-за физической специфики распространения радиоволн ионизация ионосферных слоев происходит неоднородно под воздействием солнечной активности. В результате точки отражения для протяженных радиотрасс могут находиться в разных частях планеты, что объясняет максимальное количество возможных скачков – до шести, поскольку при этом радиоволна может полностью обойти планету.

В рамках исследуемой дальнемагистральной системы связи на уровень битовых ошибок одновременно влияют два ключевых фактора: соотношение сигнал/шум и степень фазовых искажений, возникающая из-за доплеровского сдвига, вызванного случайным движением неоднородностей ионосферы [5]. Это приводит к тому, что даже при

высоком уровне сигнала на входе демодулятора могут возникать затруднения с приёмом из-за фазовых искажений, что в конечном итоге негативно сказывается на качестве связи [6]. Предметом исследования выступают модели и методы функционирования радиолиний ДКМ радиосвязи, что позволяет оценить влияния различных факторов, таких как изменение длины преамбулы и использование адаптивных фильтров, на помехоустойчивость системы.

Для повышения помехоустойчивости декаметрового радиоканала в системах дальнемагистральной связи, в данном исследовании формулируются следующие задачи:

1. Экспериментальная апробация комплексной модели ДКМ радиолинии, которая включает в себя расчетную модель радиотрассы и полевые измерения профиля ДКМ радиолинии. Эта апробация позволит научно обосновать выбор параметров передачи на основе отношения сигнал / шум (ОСШ) с учетом различных длин преамбул.

2. Создание эквалайзера и настройка его конфигурационных файлов для обеспечения надежной доставки данных во время сеанса радиосвязи с заданным качеством и минимальными потерями информации. Программная реализация данного эквалайзера будет выполнена через имитационное моделирование в программной среде Simulink, с учетом характеристик рэлеевского канала.

Основной научной задачей исследования является разработка, программная реализация и экспериментальная проверка эквалайзера с конфигурационными файлами настройки, учитывающего как расчетную модель радиотрассы, так и полевые измерения профиля ДКМ радиолинии [7]. Материал настоящего исследования организован далее следующим образом. Раздел 2 посвящен разработке эквалайзера и конфигурационных файлов его настройки для обеспечения доставки данных за сеанс радиосвязи представлена в разделе 4. Результаты экспериментальной апробация комплексной модели ДКМ радиолинии описаны в разделе 5. Выводы и направления дальнейших исследований приводятся в заключении.

3. Методика исследования. Анализ применяемых сигнально-кодовых конструкций (СКК). Формирование СКК основывается на операциях преобразования информационной последовательности в кодовую посредством внесения избыточности, а также преобразования кодовой последовательности в канальную с использованием манипуляционного кода. Одной из ключевых операций в этом процессе является помехоустойчивое кодирование, которое увеличивает энергетическую эффективность системы связи. Энергетический выигрыш, получаемый от кодирования, зависит от степени увеличения минимального сигнального расстояния между разрешенными кодовыми блоками [8].

Основные признаки классификации СКК включают:

- типы помехоустойчивого кода;
- типы ансамблей сигналов;
- способы согласования модуляции и кодирования.

На выбор параметров СКК также оказывают влияние два ключевых фактора, обусловленных искажением сигнала в результате прохождения электромагнитной волны через ионосферу:

- отношение сигнал/шум на входе демодулятора;
- величина фазового искажения.

На рис. 1 [9] приведены минимальные требуемые отношения сигнал/шум (ОСШ) для различных уровней битовых ошибок, что иллюстрирует влияние этих факторов на параметры СКК.

На рис. 2 [9] ниже представлена зависимость битовых ошибок от величины фазового искажения.

В применяемой одночастотной сигнально-кодовой конструкции СКК используется два вида модуляции – QPSK (Offset Quadrature Shift Keying) и BPSK (Quadrature Shift Keying). Мотивацией к выбору данных методов послужила необходимость применения в системе четырехпозиционной манипуляции (QPSK) для достижения необходимых значений спектральной и энергетической эффективности [10]. Относительно высокое значение пик-фактора сигнала QPSK (до 3.6 дБ) не позволяет эффективно использовать усилители мощности передающих устройств.

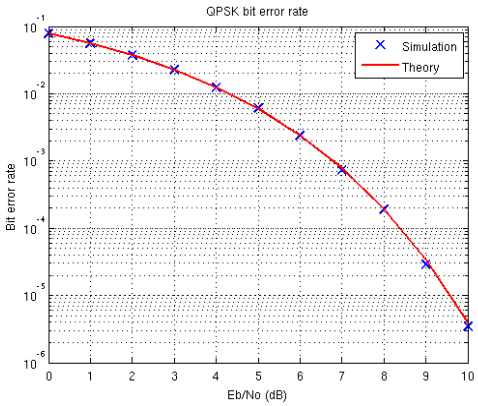


Рис. 1. Минимальные требуемые ОСШ для разных уровней битовых ошибок

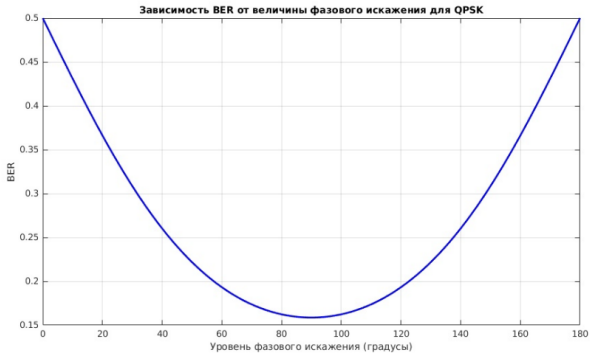


Рис. 2. Зависимость битовых ошибок от величины фазового искажения

BPSK и QPSK демодуляторы имеют разное допустимое окно фазовой ошибки и, при повышении фазовых ошибок в радиоканале, необходимо будет произвести оператору смену модуляции QPSK на BPSK, тем самым допуская двукратное снижение технической, как следствие – пользовательской, скорости передачи данных. Теоретический смысл разработанной модели и показанной зависимости на рис. 4 в подборе граничных значений уровня фазовых искажений принимаемого сигнала, при учете которого, за счет использования вариации длины преамбулы в модуляции QPSK [11], не нужно будет переключаться на модуляцию BPSK, как следствие, обеспечив большую скорость передачи информационных данных, чем в BPSK.

В предлагаемом методе повышения помехоустойчивости декаметрового радиоканала допускается следующее, что при использовании фиксированной длины пакета данных операция по увеличению длины преамбулы снизит количество пользовательской информации в пакете, тем самым приведя к снижению скорости передачи пользовательских данных.

Чтобы проверить предложенный метод на практике была использована модель в пакете программ Simulink, сконфигурированная под иммитатор действующего дальнемагистрального ДКМ радиоканала. Следует также заметить, что использование среды Matlab Simulink не ограничивается только вопросами моделирования. Развитые средства Matlab Simulink благодаря поддержки со стороны ведущих производителей программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [13] и цифровых процессоров обработки сигналов (ЦПОС) позволяют во многих случаях многократно ускорить разработку программного обеспечения (ПО) путём автоматического создания кода на языках описания аппаратуры (HDL-языки) и языке программирования C/C++, благодаря наличию пакета Real-Time Workshop, можно генерировать код на языке C/C++ без привязки к конкретному оборудованию.

Результаты моделирования распространения радиоволн в ДКМ радиоканале показали, что используемые в моделях программные эквалайзеры являются эффективным средством для улучшения помехоустойчивости. Снижение требуемого ОСШ для заданного уровня битовых ошибок (BER) подтверждает значимость данной технологии в контексте обеспечения качественной связи. Рекомендации по применению методик и моделей в вопросе повышения помехоустойчивости, которые формируются, должны включать в себя алгоритмы, адаптированные для обработки данных с учетом специфики ионосферного распространения радиосигналов. Это может включать использование методов машинного обучения для прогнозирования характеристик ЭМП на основе исторических данных, а также разработку имитационных моделей, которые упростят анализ различных условий распространения [13].

4. Разработка архитектуры и алгоритма работы радиоканала, с учетом специфики ионосферного распространения радиосигналов, адаптированный для обработки данных программный эквалайзер. Эквалайзер представляет собой цифровой настраиваемый фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ), который используется для коррекции различных искажений сигналов, возникающих в процессе передачи и приема. Основной задачей эквалайзера является компенсация фазовых искажений принимаемого радиосигнала, что позволяет улучшить качество воспроизводимого сигнала.

Структура эквалайзера может быть как линейной, так и нелинейной. Линейный эквалайзер представляет собой КИХ-фильтр с функцией задержки, который хранит отсчеты принятого сигнала. В процессе работы системы эквалайзер сохраняет данные, поступающие с каждым новым тактом, и на выходе формирует взвешенную сумму значений, обновляя их для следующего такта [13, 14]. Линейные эквалайзеры могут эффективно снижать межсимвольную интерференцию (лат. ISI). Если импульсная характеристика канала равна нулю, эквалайзер может начать усиливать шум, что снижает качество сигнала.

В этом контексте выделяют несколько популярных методов адаптивной фильтрации, таких как RLS (Recursive Least Squares), LMA (Levenberg-Marquardt Algorithm) и CMA (Constant Modulus Algorithm) [15]. CMA может эффективно выполнять коррекцию, устраняя искажения, возникающие из-за многолучевого распространения и других помех. LMS (Least Mean Squares) эквалайзеры обладают быстрым процессом обучения и требуют невысоких объемов памяти для хранения коэффициентов, что делает их эффективными для применения в радиосистемах. RLS эффективно определяет каждый новый коэффициент на основе предыдущих значений. Такой подход позволяет снижать уровень межсимвольной интерференции в частотно-селективных каналах радиосвязи, причем при нулевой импульсной характеристике канала шум не усиливается.

В линейных и нелинейных структурах эквалайзеров применяются разные алгоритмы для установки весовых коэффициентов [16]. Эти коэффициенты зависят от:

- значений весовых коэффициентов на предыдущем периоде;
- сигнала на входе эквалайзера;
- сигнала на выходе эквалайзера;
- эталонного сигнала (целевого сигнала), с которым производится сравнение.

В результате был использован при моделировании наиболее эффективный алгоритм для определения коэффициентов эквалайзера в декаметровом радиоканале ионосферной радиосвязи на основе алгоритма RLS DFE (рекурсивный алгоритм наименьших квадратов с обратной связью) [17]. Этот алгоритм позволяет минимизировать среднеквадратическую ошибку между ожидаемым выходом фильтра и фактическим выходом, что достигается путем обновления коэффициентов эквалайзера на каждой итерации.

Так алгоритм работы эквалайзера состоит из следующих шагов:

1. Инициализация эквалайзера: устанавливаются начальные значения коэффициентов эквалайзера, которые могут быть заданы случайным образом или инициализированы заранее.

2. Подача входного сигнала: на вход эквалайзера подается сигнал, требующий коррекции и компенсации.

3. Вычисление выходного сигнала: коэффициенты эквалайзера применяются к входному сигналу для получения выходного сигнала.

4. Определение ошибки: вычисляется разница между ожидаемым выходом фильтра (целевым сигналом) и фактическим выходом фильтра. Эта разница называется ошибкой, которую необходимо минимизировать [18].

5. Обновление коэффициентов: коэффициенты эквалайзера обновляются на каждой итерации путем умножения ошибки на входной сигнал и на некоторый множитель, известный как шаг обучения. Этот процесс продолжается до тех пор, пока ошибка не будет минимизирована.

6. Завершение работы: после достижения минимальной ошибки или по истечении заданного числа итераций алгоритм завершает свою работу.

Таким образом, данный алгоритм позволяет не только минимизировать ошибки передачи, но и адаптировать систему радиосвязи к динамичным условиям радиоканала. Итоговый вариант применяемого в радиоканале алгоритма адаптации представлен на рис. 3.

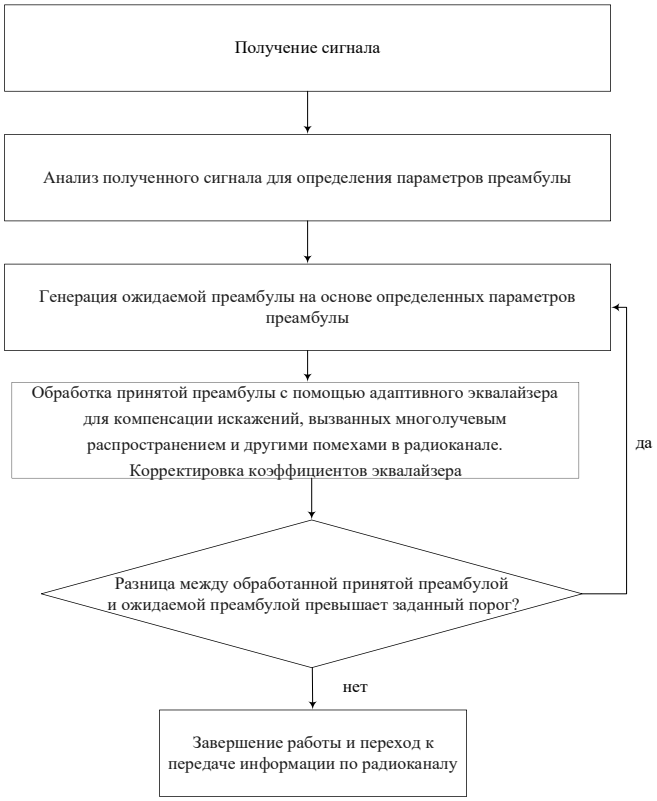


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы адаптивного эквалайзера

Сравнение обработанной принятой преамбулы с ожидаемой является ключевым этапом в процессе настройки эквалайзера [19]. Если разница между этими двумя последовательностями превышает заданный порог, это сигнализирует о необходимости корректировки коэффициентов эквалайзера. Эта корректировка направлена на уменьшение искажений в принимаемом сигнале.

Как только эквалайзер достигнет оптимальных значений коэффициентов, система переходит к передаче информации по радиоканалу. На этом этапе эквалайзер будет работать с установленными параметрами, что позволяет поддерживать высокое качество связи даже в условиях, характеризующихся сложными и переменчивыми условиями передачи, такими как изменения в структуре ионосферы.

Исследование производительности эквалайзера на базе программной среды моделирования Simulink является важным шагом для оценки его эффективности в цифровых системах связи. С помощью этого инструмента можно легко настроить и варьировать

различные параметры эквалайзера, а также анализировать его работу в условиях влияния каналов с многолучевостью и помехами [19]. Процесс исследования нацеливается на определение представленных параметров эквалайзера для достижения лучшей помехоустойчивости в условиях реального радиоканала связи. При помощи Simulink можно провести мультипараметрическое исследование, варьируя один или несколько параметров одновременно и анализируя поведение эквалайзера по различным критериям, таким как уровень ошибок, скорость адаптации и ОСШ принимаемого сигнала.

Исследование эквалайзера производилось на основе цифровой системы связи (стандарт (модель системы) MIL-STD 110D), которая включает в себя несколько ключевых компонентов:

- сверточное кодирование (1/2): сверточные кодеры используются для обеспечения надежной передачи данных с помощью добавления избыточности. Код 1/2 означает, что на выходе кода количество битов удваивается по сравнению с входящими данными, что улучшает устойчивость к ошибкам;
- блочное кодирование (31, 23): блочные кодеры работают с фиксированными блоками данных и обеспечивают исправление ошибок. Например, код (31, 23) указывает на то, что из 31 бита данных 23 бита используются для передачи полезной информации, а остальные являются избыточными для защиты от ошибок;
- перемежитель (20×20): перемежитель используется для рассеивания ошибок и улучшения передачи данных в системах связи. Он разбивает данные на блоки и повторно комбинирует их, что повышает устойчивость к помехам и улучшает общее качество связи.

В процессе исследования были выявлены оптимальные параметры настройки эквалайзеров для различных сценариев работы в радиоканале. Эти комбинации параметров могут включать [20]:

- длину линии задержки (позволяет улучшить адаптивность эквалайзера к изменениям в канале);
- коэффициенты фильтров (пересчитанные значения помогают минимизировать искажения);
- коэффициент забывания (ускоряет или замедляет процесс адаптации фильтра к изменениям в канале.

5. Результаты проведенных исследований на трассовых испытаниях. Проведенные исследования, а также полученные результаты по моделированию работы декаметрового радиоканала привели к необходимости организации трассовых испытаний. Эксперимент, который состоялся в ноябре 2024 года между двумя стационарными позициями в Санкт-Петербурге и Иркутске на расстоянии 4 450 км, стал следующим шагом в исследовании. Ионосферное распространение радиоволн с двумя точками отражения предоставляет уникальную возможность анализировать реальные условия передачи сигналов на больших расстояниях. Адаптивные технологии, основанные на этих исследованиях, показывают потенциал в обеспечении более высокой надежности и стабильности связи, что критично для многих приложений, включая экстренные службы, авиацию и морскую связь. В табл. 1 приведены уровни мощности, зафиксированные при проведении эксперимента.

Таблица 1

Уровни мощностей при проведении эксперимента

Серия (мощность)	Номер серии							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5 Вт	23	13	13	12	13	12	13	23
10 Вт	28	16	18	18	18	17	18	27
Время приёма (МСК)	09:16	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00

Время восхода: 09 часов 28 минут. Время заката: 16 часов 04 минут.

На рис. 4 представлено теоретическое отображение точек отражения радиоволны от ионосферы и поверхности земли, взятый из расчетной модели при подготовке к началу сеанса связи.

Рис. 4 позволяет визуализировать путь, по которому проходит радиосигнал, где синие точки – точки отражения от ионосферы, красные – от поверхности Земли.

Для проведения трассовых испытаний в рамках исследования улучшения помехоустойчивости цифровой системы радиосвязи был использован следующий комплект оборудования:

1. Трансивер Icom IC-7300: этот многофункциональный трансивер предназначен для работы в различных диапазонах частот и предлагает широкий спектр возможностей, включая цифровые режимы передачи.

2. Антенна магнитная SpiderLoop A100: Эта антенна является компактным и эффективным решением для работы в диапазоне коротких волн (КВ). SpiderLoop A100 обладает хорошими характеристиками направленности и поддерживает широкую полосу частот.

3. Прочее вспомогательное оборудование: В состав вспомогательного оборудования вошли источники питания и фидерные линии с импедансом 50 Ом, которые обеспечивали надежное подключение трансивера и антенны. Использование качественных фидерных линий крайне важно для минимизации потерь сигнала и обеспечения стабильной работы всей системы.

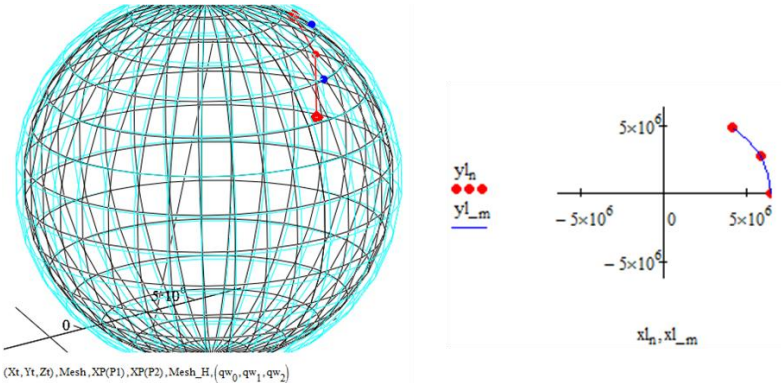


Рис. 4. Отображение точек отражения радиоволны на пути распространения

Рис. 5. Оборудование корреспондентов радиолинии

На рис. 5 представлен общий вид оборудования, использованного при проведении трассовых испытаний [2].

Это изображение позволяет лучше понять конфигурацию экспериментальной установки и взаимодействие элементов системы.

Для проведения эксперимента по исследованию помехоустойчивости цифровой системы радиосвязи был выбран сигнал с фазовой манипуляцией (BPSK) со следующими параметрами:

- скорость передачи данных: 800 бит/с;
- длительность сигнала: 5 секунд;
- частота дискретизации: 8 000 Гц.

С помощью функции «pskmod» в программной среде Simulink был сформирован сигнал BPSK. В результате был получен вектор данных, содержащий 40 000 отсчетов. Полученный вектор данных был вставлен в заранее созданный «чистый» файл формата WAV. Это позволило обеспечить совместимость с воспроизведением звуковых частот через трансивер. Передача файла производилась с трансивера Icom IC-7300 при помощи стандартной функции воспроизведения WAV файлов. Такой подход позволил использовать цифровые режимы передачи, обеспечивая более высокое качество и надежность по сравнению с аналоговыми сигналами.

В результате проведенного эксперимента удалось создать проверенный BPSK сигнал, который затем был передан на значительном расстоянии подключения радиоканала. Полученные данные и результаты обеспечивают важную основу для дальнейшего анализа, включая оценку помехоустойчивости системы и параметров работы эквалайзеров в условиях реального ДКМ радиоканала [21].

Прием сигнала на стороне получателя осуществлялся с использованием встроенных средств трансивера Icom IC-7300, который обеспечивает высококачественную запись демодулированного сигнала в полосе звуковых частот. Основные параметры для записи принятого сигнала это использование цифрового полосового фильтра (0.3–3.1 КГц). Этот диапазон соответствует частотам, необходимым для обработки BPSK сигналов, минимизируя влияние шумов и интерференций из других диапазонов.

Запись радиоэфира начиналась по предварительной договоренности между абонентами испытываемого радиоканала и останавливалась сразу после окончания передачи сигнала, который обнаруживался "на слух". Записанный файл имел формат WAV и сохранил те же параметры, что и передаваемый файл, что позволяет в дальнейшем проводить сравнительный анализ. Процесс исследования нацеливается на определение представленных параметров эквалайзера для достижения лучшей помехоустойчивости в условиях реального радиоканала связи. При помощи Matlab Simulink можно провести мультипараметрическое исследование, варьируя один или несколько параметров одновременно и анализируя поведение эквалайзера по различным критериям, таким как уровень ошибок, скорость адаптации и ОСШ принимаемого сигнала.

Полученные записи сигналов позволяет выполнить анализ двух сигналов в векторной форме с использованием Simulink. Это важный этап при оценке качества передачи и помехоустойчивости. Для обнаружения сигнала в заранее записанном файле была использована функция «Xcorr». Эта функция вычисляет взаимную корреляцию между двумя векторами и позволяет определить степень схожести между переданным и принятым сигналами.

Анализ полученной взаимной корреляции позволяет сделать следующие выводы: пик в графике корреляции указывает на успешное обнаружение сигнала. Чем выше значение корреляции, тем ближе принятый сигнал к исходному сигналу. Распределение значений корреляции также может дать представление о наличии шумов и возможной интерференции [22].

В процессе записи радиоэфира была учтена особенность, что запись начиналась заранее, до появления BPSK сигнала. Это привело к тому, что около половины длительности принятого сигнала содержит собственный шум радиоприемника. Обнаружение нужного сигнала происходило в середине файла, что создало определенные сложности при анализе. Неполная магнитуда работы коррелятора связана с наличием битовых ошибок в принятом файле. Эти ошибки могли быть вызваны несколькими факторами:

1. Проблемы с ионосферным каналом: нестационарный характер ионосферного взаимодействия может вызывать флуктуации сигнала, что приводит к потере информации и возникновению помех [23].

2. Влияние шумов: шумы радиоприемника и внешние интерференции также могут ухудшать качество принятого сигнала, создавая дополнительные помехи, которые влияют на точность корреляции.

После успешного обнаружения сигнала в векторной форме был выполнен процесс наложения спектров переданного и принятого сигналов для их однозначной идентификации. На рис. 6 представлен результат наложения спектров переданного и принятого сигналов.

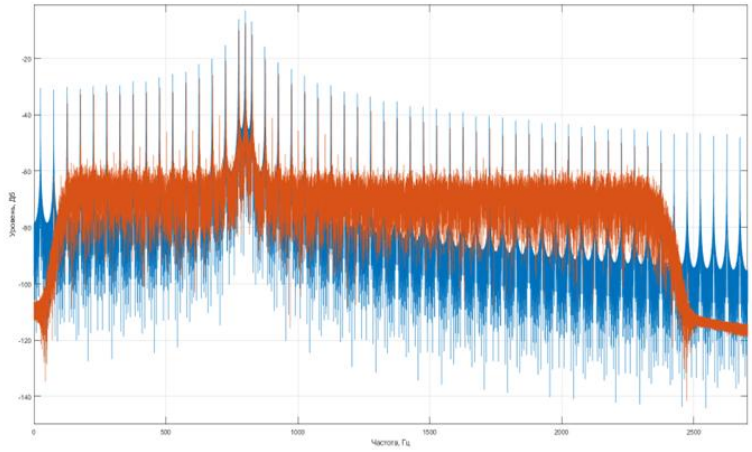


Рис. 6. Спектры переданного (синий цвет) и принятого (оранжевый цвет) сигналов

На рис. 7 видно, что спектры переданного и принятого сигналов хорошо совпадают, что свидетельствует о том, что сигнал был идентифицирован верно. Это подтверждает корректность передачи BPSK сигнала и эффективность используемых технологий радиосвязи. При наложении спектров можно выделить:

- сравнение амплитуд: уровень амплитуды сигналов позволяет оценить, насколько корректно был принят сигнал;
- фазовые искажения: анализ наложенных спектров также позволяет выявить возможные фазовые искажения, которые могут указывать на изменения в распространении сигнала.

При углубленном анализе спектральных составляющих обнаружено несовпадение частот переданного и принятого сигналов. Это несоответствие связано с доплеровским сдвигом частоты, который возникает в результате относительного движения между передатчиком и приемником. В данном контексте это может происходить из-за движения атмосферы, а также изменения положения оборудования.

Зависимость повышения помехоустойчивости от работы эквалайзера, выраженная через количество битовых ошибок (BER), от длины преамбулы представлена на рис. 7 [22].

На основе анализа кривых, представленных на рис. 7, можно сделать несколько ключевых наблюдений по эффективности различных длины преамбулы в контексте применения канального эквалайзера:

1. При длине преамбулы в 40 символов и более (в составе пакета 800 бит) достигается приемлемый уровень битовых ошибок (BER $\approx 10^{-3}$) начиная с ОСШ равным 20 дБ.
2. Для преамбулы длиной 100 символов приемлемый BER также достигается при ОСШ равного 20 дБ.
3. Увеличение длины преамбулы более 100 бит не приводит к значительному улучшению помехоустойчивости, что говорит о наличии оптимального диапазона.
4. Без применения канального эквалайзера уровень битовых ошибок составляет 0.5, что указывает на значительное ухудшение качества передачи в условиях ионосферного канала.

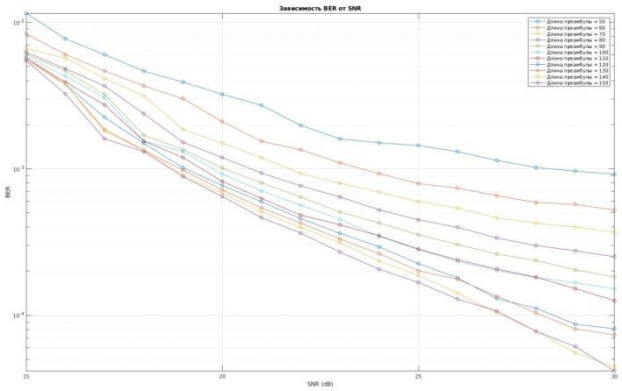


Рис. 7. Зависимость BER от длины преамбулы

В условиях ионосферного канала радиосвязи протяженностью 4450 км использование канального эквалайзера позволило снизить уровень битовых ошибок с 0.5 до 10^{-3}. Оптимальная длина преамбулы должна находиться в диапазоне от 40 до 100 бит в пакете передаваемой информации. Кроме использования эквалайзеров, применение помехоустойчивого кодирования может дополнительно снизить требования к уровню сигнала на 4 дБ, что, тем не менее, может привести к уменьшению скорости передачи полезной информации.

Для информационной скорости 600 бит/с с модуляцией BPSK в условиях Рэлеевского двухлучевого радиоканала с разницей хода лучей 5×10^{-4} с исследования были проведены при различных длинах преамбулы (50, 70 и 100 бит), что позволило понять, как изменение длины преамбулы повлияло на качество и надежность передачи данных в ДКМ радиоканале.

При подстройке эквалайзера на работу радиоканала с настройками для передачи сигнала с BPSK – параметры Forward Taps [19] играют ключевую роль в компенсации фазовых искажений, вызванных каналом передачи сигнала. Они определяют количество задержек сигнала в прямом направлении, тем самым это позволяет добиться лучшего качества восстановления сигнала. Увеличение числа отводов в Forward Taps может улучшить способность эквалайзера к компенсации различных эффектов, таких как межсимвольные интерференции (лат. ISI) и фазовые искажения. Feedback Taps, в отличие от Forward Taps, более акцентированы на улучшении качества восстановления сигнала за счет учета ранее полученной информации о выходе эквалайзера. Однако в текущем первичном исследовании установка параметра Feedback Taps равным 1 является подходящим решением, поскольку это позволяет сосредоточиться на адаптации Forward Taps, тем самым позволив наилучшим образом компенсировать фазовые искажения. Reference Taps определяют количество отводов линии задержки и в данном случае устанавливаются равными 10. Повышение количества Reference Taps, например, до 11, не приводит к значительным улучшениям в качестве компенсации. Это может свидетельствовать о том, что система уже достаточно скомпенсирована с текущим количеством отводов, и добавление дополнительных «Taps» не дает дополнительного выигрыша по качеству принимаемого в радиоканале сигнала. В табл. 2 продемонстрированы результаты по уровням BER при различных длинах Forward Taps.

По итогам проведенного анализа (табл. 2) и реальных данных трассовых испытаний эквалайзера, был установлен оптимальный набор параметров, которые обеспечивают наименьшее количество битовых ошибок (BER) для различных длин преамбулы. Установлен оптимальный набор параметров, которые обеспечивают наименьшее количество битовых ошибок (BER) для различных длин преамбулы:

- Forward Taps: 10 – это значение показало самые лучшие результаты по снижению числа ошибок для всех длин преамбулы;

♦ Feedback Taps: 1 – изменение значения Feedback Taps на 11 и более приводит к недостаточной эффективности эквалайзера, так как на значениях 12 и выше восстанавливаемый сигнал становится некорректным, а декодирование невозможно;

♦ Reference Taps: 10 – используется фиксированное количество отводов, что обеспечивает необходимую эффективность эквалайзера.

Таблица 2

Полученные значения при различных длинах Forward Taps

Forward Taps	BER (100 bits)	BER (70 bits)	BER (50 bits)
10	1.78×10^{-3}	1.83×10^{-3}	3.41×10^{-3}
11	3.86×10^{-3}	1.94×10^{-3}	3.51×10^{-3}
12	2.29×10^{-3}	2.06×10^{-3}	3.42×10^{-3}
13	2.44×10^{-3}	2.32×10^{-3}	4.43×10^{-3}
14	2.36×10^{-3}	2.27×10^{-3}	4.28×10^{-3}
15	2.47×10^{-3}	2.33×10^{-3}	4.63×10^{-3}
16	2.52×10^{-3}	2.59×10^{-3}	4.78×10^{-3}
17	2.84×10^{-3}	3.31×10^{-3}	4.83×10^{-3}
18	2.87×10^{-3}	3.28×10^{-3}	5.81×10^{-3}
19	2.95×10^{-3}	3.12×10^{-3}	5.59×10^{-3}
20	2.87×10^{-3}	3.02×10^{-3}	5.67×10^{-3}
21	3.15×10^{-3}	3.07×10^{-3}	5.91×10^{-3}

Моделирование работы цифровой системы связи с использованием эквалайзера с заданными параметрами было проведено для модуляции BPSK. Разница хода лучей в рэлеевском двухлучевом радиоканале: 5×10^{-4} с. На рис. 8 представлен спектр сформированного сигнала с преамбулой длиной 50 бит, что является критически важным параметром, так как преамбула служит для эквалайзера в качестве эталона для коррекции искажений. Важно, чтобы спектр был четким и соответствовал ожидаемым значениям, что позволяет сделать вывод по достижению снижения уровня BER и уменьшению влияния помех и искажений – повышению качества принимаемого сигнала.

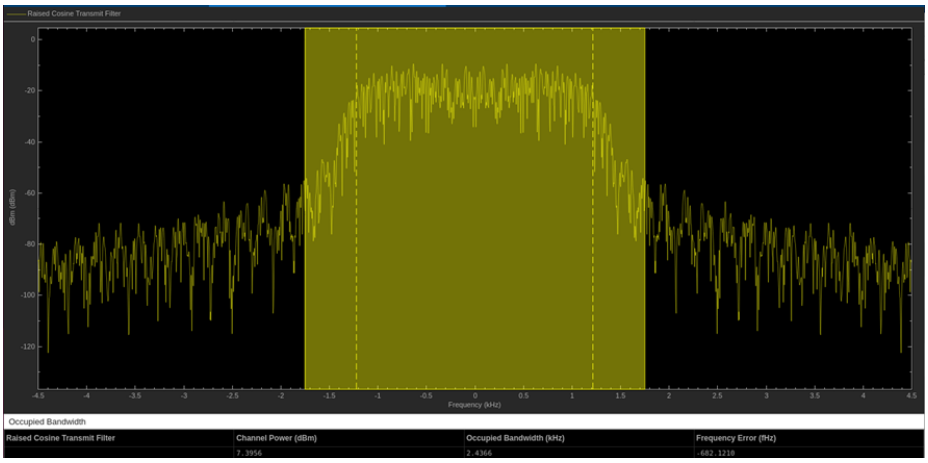


Рис. 8. Спектр сформированного сигнала BPSK

На рис. 9 представлена зависимость уровня BER от ОСШ, при длинах преамбулы от 10 до 100 бит.

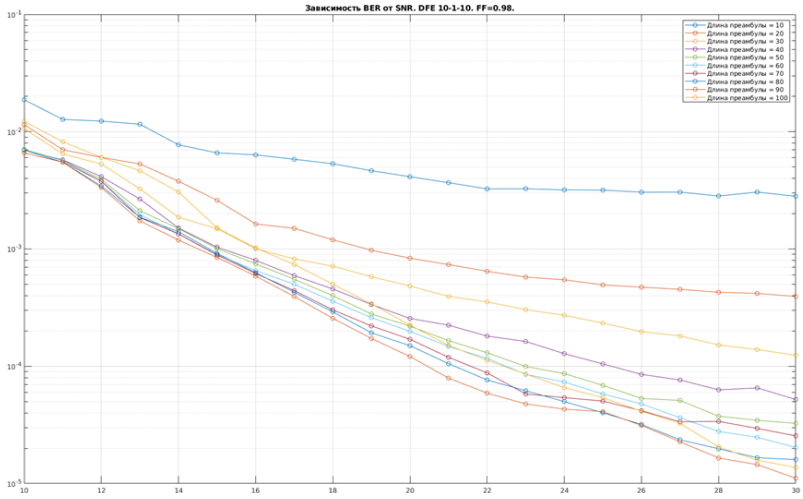


Рис. 9. Зависимость BER от ОСШ для длины преамбулы от 10 до 100 бит (модуляция BPSK)

Этот анализ подчеркивает важные аспекты влияния на качество связи и производительность эквалайзера в контексте ДКМ радиоканала.

Выводы по выбору длин преамбулы и влиянию на уровень BER:

1. Использование преамбулы длиной от 10 бит приводит к BER, превышающему уровень 10^{-3}, что не удовлетворяет минимальным требованиям качества цифровой связи.

2. При длине преамбулы 20 бит наблюдается улучшение качества связи, однако уровень ослабления сигнала (ОСШ на уровне 19 дБ) является недостаточным для получения дальнейшего качественного приема.

3. В диапазоне длин преамбулы от 50 до 100 бит уровень BER достигает 10^{-3}, при ОСШ от 13,5 до 15 дБ, что демонстрирует ранее не достигнутое улучшение качества связи.

На основе приведенных данных можно сделать вывод, что для заданных условий распространения радиосигнала и скорости передачи данных наиболее оптимальной длиной преамбулы является 50 бит. Это значение обеспечивает приемлемое качество связи при достаточно низком уровне BER и минимальных требованиях к ОСШ.

Выводы и рекомендации. Исследование зависимости BER от длины преамбулы и конфигурации обратной связи в эквалайзере подчеркивает значимость правильных параметров настройки для достижения помехоустойчивой передачи данных по радиоканалам.

Выводы по решению комплексной задачи исследования и рекомендации по применению конфигураций эквалайзера на приемной стороне декаметровой радиолинии:

1. При реализации решений для реальных радиоканалов целесообразно оптимально настраивать длину линии задержки в обратной связи (Feedback Taps) в зависимости от наблюдаемых условий канала. Это позволит находить баланс между сложностью эквалайзера и его производительностью.

2. Система оценки. Рекомендовано проводить оценки работы эквалайзера в реальных условиях, чтобы подтвердить эффективность найденных оптимальных настроек. Это позволит адаптировать параметры эквалайзера к специфическим требованиям различного окружения и условий распространения радиосигнала.

3. Оптимизация для следующих исследований. В будущем можно исследовать возможность работы с различными модуляциями и изменениями условий подготовки сигналов, что может помочь в дальнейшем оптимизировать настройки эквалайзеров и улучшить качество дальнемагистральной декаметровой радиосвязи.

Исследование зависимости BER от длины преамбулы и конфигурации обратной связи в эквалайзере подчеркивает значимость правильных параметров настройки для достижения помехоустойчивой передачи данных по радиоканалам.

Научная новизна проведенного исследования заключается в применении разработанных конфигурационных файлов настройки эквалайзера, которые впервые учитывают соотношение размера информационного сообщения к размеру преамбулы для заданной в сеансе связи помехоустойчивости.

Проведенная экспериментальная апробация комплексной модели ДКМ радиолинии и приемного эквалайзера с конфигурационными файлами настройки и варьируемой длиной преамбулы впервые показала возможность работы при отношении сигнал-шум от 13,5 дБ с вероятностью ошибки не более 10^{-3} без предварительного зондирования ионосферы.

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании варьирования длины преамбулы, как средства адаптации эквалайзера в заданном сценарии помехоустойчивости.

Практическая значимость работы заключается в подтверждении возможности работы ДКМ радиолинии при отношении сигнал/шум от 13,5 дБ с вероятностью ошибки 10^{-3} без предварительного зондирования ионосферы для сеансов связи продолжительностью несколько часов.

Совокупность полученных результатов позволяет говорить о решении комплексной научной задачи разработки, реализации и экспериментальной апробации приемного эквалайзера с конфигурационными файлами настройки и варьируемой длиной преамбулы в заданном сценарии помехоустойчивости для сеансов связи продолжительностью несколько часов.

Оптимизация длины преамбулы позволяет значительно улучшить производительность и снизить количество битовых ошибок. Эти результаты подчеркивают важность тщательного проектирования систем радиосвязи и настройки адаптивных алгоритмов, что будет способствовать повышению надежности передачи данных и улучшению общего качества связи. Данная работа открывает новые горизонты для исследований в области адаптивной фильтрации и эквализации, нацеленных на борьбу с проблемами, возникающими в результате динамичных условий распространения радиоволн в ионосфере.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воробьев О.В., Рыбаков А.И.* Вариант реализации двунаправленной связи в СМС (системе метеорной связи). Описание программно-аппаратного комплекса СМС // Матер. VII Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании». – 2017. – С. 128.
2. *Воробьев О.В., Рыбаков А.И.* Разработка мобильной системы информационного обеспечения с использованием каналов метеорной связи // Матер. VI Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании». – 2016. – С. 177.
3. *Грудинская Г.П.* Распространение радиоволн: монография. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.
4. *Зюко А.Г., Фалько А.И., Панфилов И.П. [и др.].* Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. – М.: Радио и связь, 1985.
5. *Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В. /* под ред. Кловского Д.Д. Теория электрической связи: учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1999. – 432 с.
6. *Кларк Дж.* Кодирование с неправлением ошибок в системах цифровой связи. – М.: Мир, 1987.
7. *Блейхут Р.* Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. – М.: Мир, 1986.
8. *Морелос-Сарагоса Р.* Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. – М.: Техносфера, 2005.
9. *Попов Н.А., Пятаков А.И.* Расчет территориального распределения уровней сигнала на многоскачковых радиотрассах от КВ передатчика средней мощности с антенной “Ромб” // Автоматизация процессов управления. – 2009. – № 1 (15).
10. *Прокис Дж.* Цифровая связь. – М.: Радио и связь, 2000.
11. *Баин А.М.* Способ кодирования в системах управления энергообеспечением // Естественные и технические науки. – 2012. – № 3. – С. 238-239.

12. *Самойлов А.Г., Сидоренко А.А.* Применение кодов РС в каскаде с двоичными кодами с целью повышения эффективности борьбы с независимыми ошибками // Проектирование и технология электронных средств. – 2014. – № 3. – С. 2-7.
13. *Сидоренко А.А.* Адаптивное помехоустойчивое кодирование // Матер. X международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». – Владимир-Суздаль, 2013. – Т. 1. – С. 152-154.
14. *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. – М.: Радио и связь, 2001.
15. *Черный Ф.Б.* Распространение радиоволн: монография. – М.: Сов. радио, 1972. – 464 с.
16. *Ахметянов К.К., Глушков В.А., Дормидонтов А.В., Нестеренко А.Г.* Теория электрической связи / под общ. ред. Васильева К.К. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 382 с.
17. *Hunt B.T., Haab D.B., Sego T.C., Holschuh T.V., Moradi Hunt H.* Examining the Performance of MIL-STD-188-110D Waveform 0 Against FBMC-SS Over Skywave HF Channels // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2022. – Vol. 71, No. 11.
18. *Zhang Z., Jin Z., Li Y., Song G., Wang Y.* Multi-Stage Receiver of MIL-STD-188-110D Waveform 0 for High-Frequency Communication // IEEE Communications Letters. – 2024. – Vol. 28, No. 5.
19. MIL-STD-188-110D – Interoperability and Performance Standards for Data Modems. 27 APRIL 2000.
20. *Мартышевская Д.А., Полушин П.А.* Моделирование сверточного метода обработки сигналов при межсимвольной интерференции // XXI МНК студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: Сб. докладов. – Томск: ТПУ, 2015. – С. 437.
21. *Нарышкин Е.М., Серков В.П.* Волновая служба и антенные устройства. Ч. 1. Теория электромагнитного поля и распространение радиоволн: монография. – М.: Воениздат, 1982. – 288 с.
22. *Скляр Б.* Цифровая связь. – М.: Издательский дом Вильямс, 2003. – 1104 с.
23. *Шеннон К.* Математическая теория связи. Работы по теории информации и кибернетики. – М.: Наука, 1963.

REFERENCES

1. *Vorob'ev O.V., Rybakov A.I.* Variant realizatsii dvunapravlennoy svyazi v SMS (sisteme meteornoy svyazi). Opisanie programmno-apparatnogo kompleksa SMS [A variant of implementing bidirectional communication in SMS (Meteor Communication System). Description of the software and hardware complex of SMS], *Mater. VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy i nauchno-metodicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy infokommunikatsiy v nauke i obrazovanii»* [Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference "Current Problems of Infocommunications in Science and Education"], 2017, pp. 128.
2. *Vorob'ev O.V., Rybakov A.I.* Razrabotka mobil'noy sistemy informatsionnogo obespecheniya s ispol'zovaniem kanalov meteornoy svyazi [Development of a mobile information support system using meteor communication channels], *Mater. VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy i nauchno-metodicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy infokommunikatsiy v nauke i obrazovanii»* [Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference "Current Problems of Infocommunications in Science and Education"], 2016, pp. 177.
3. *Grudinskaya G.P.* Rasprostranenie radiovoln: monografiya [Propagation of radio waves: monograph]. Moscow: Vysshaya shkola, 1975, 280 p.
4. *Zyuko A.G., Fal'ko A.I., Panfilov I.P. [i dr.].* Pomekhoustoychivost' i effektivnost' sistem peredachi informatsii [Noise immunity and efficiency of information transmission systems]. Moscow: Radio i svyaz', 1985.
5. *Zyuko A.G., Klovskiy D.D., Korzhik V.I., Nazarov M.V.* Ed. by Klovskogo D.D. Teoriya elektricheskoy svyazi: uchebnik dlya vuzov [Theory of Electric Communication: textbook for higher education institutions]. Moscow: Radio i svyaz', 1999, 432 p.
6. *Klark Dzh.* Kodirovanie s nepravleniem oshibok v sistemakh tsifrovoy svyazi [Coding with error control in digital communication systems]. Moscow: Mir, 1987.
7. *Bleykhut R.* Teoriya i praktika kodov, kontroliruyushchikh oshibki [Theory and practice of error-control codes]. Moscow: Mir, 1986.
8. *Morelos-Saragosa R.* Iskusstvo pomekhoustoychivogo kodirovaniya. Metody, algoritmy, primenenie [The art of noise-immunity coding. Methods, algorithms, applications]. Moscow: Tekhnosfera, 2005.
9. *Popov N.A., Pyatakov A.I.* Raschet territorial'nogo raspredeleniya urovney signala na mnogoskachkovykh radiotrassakh ot KV peredatchika sredney moshchnosti s antennoy “Romb” [Calculation of the territorial distribution of signal levels on multi-hop radio links from an HF transmitter of average power with a "Rhombus" antenna], *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2009, No. 1 (15).
10. *Prokis Dzh.* Tsifrovaya svyaz' [Digital communication]. Moscow: Radio i svyaz', 2000.

11. *Bain A.M.* Sposob kodirovaniya v sistemakh upravleniya energoobespecheniem [Encoding method in energy management systems], *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences], 2012, No. 3, pp. 238-239.
12. *Samoylov A.G., Sidorenko A.A.* Primenenie kodov RS v kaskade s dvoichnymi kodami s tsel'yu povysheniya effektivnosti bor'by s nezavisimymi oshibkami [Application of RS codes in cascade with binary codes to increase efficiency in combating independent errors], *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and Technology of Electronic Devices], 2014, No. 3, pp. 2-7.
13. *Sidorenko A.A.* Adaptivnoe pomekhoustoychivoe kodirovanie [Adaptive noise-immune coding], *Mater. X mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii»* [Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference "Promising Technologies in Information Transmission Means"]. Vladimir-Suzdal', 2013, Vol. 1, pp. 152-154.
14. *Feer K.* Besprovodnaya tsifrovaya svyaz'. Metody modulyatsii i rasshireniya spectra [Wireless digital communication. modulation and spread spectrum techniques]. Moscow: Radio i svyaz', 2001.
15. *Chernyy F.B.* Rasprostranenie radiovoln: monografiya [Propagation of radio waves: monograph]. Moscow: Sov. radio, 1972, 464 p.
16. *Akhmetyanov K.K., Glushkov V.A., Dormidontov A.V., Nesterenko A.G.* Teoriya elektricheskoy svyazi [Theory of electric communication], ed. by Vasil'eva K.K. Ul'yanovsk: UlGTU, 2008, 382 p.
17. *Hunt B.T., Haab D.B., Sego T.C., Holschuh T.V., Moradi Hunt H.* Examining the Performance of MIL-STD-188-110D Waveform 0 Against FBMC-SS Over Skywave HF Channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, Vol. 71, No. 11.
18. *Zhang Z., Jin Z., Li Y., Song G., Wang Y.* Multi-Stage Receiver of MIL-STD-188-110D Waveform 0 for High-Frequency Communication, *IEEE Communications Letters*, 2024, Vol. 28, No. 5.
19. MIL-STD-188-110D – Interoperability and Performance Standards for Data Modems. 27 APRIL 2000.
20. *Martyshevskaya D.A., Polushin P.A.* Modelirovanie svertochnogo metoda obrabotki signalov pri mezhsimvol'noy interferentsii [Modeling of convolutional signal processing methods under intersymbol interference], *XXI MNK studentov i molodykh uchenykh «Sovremennye tekhnika i tekhnologii»: Sb. dokladov* [XXI Conference of Students and Young Scientists "Modern Techniques and Technologies": Collection of Reports]. Tomsk: TPU, 2015, pp. 437.
21. *Naryshkin E.M., Serkov V.P.* Volnovaya sluzhba i antennye ustroystva. Ch. 1. Teoriya elektromagnitnogo polya i rasprostranenie radiovoln: monografiya [Wave service and antenna devices. Part 1. Theory of electromagnetic field and radio wave propagation: monograph]. Moscow: Voenizdat, 1982, 288 p.
22. *Sklyar B.* Tsifrovaya svyaz' [Digital communication]. Moscow: Izdatel'skiy dom Vil'yams, 2003, 1104 p.
23. *Shennon K.* Matematicheskaya teoriya svyazi. Raboty po teorii informatsii i kibernetiki [Mathematical Theory of Communication. Works on Information Theory and Cybernetics]. Moscow: Nauka, 1963.

Рыбаков Алексей Игоревич – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; e-mail: lexeus.r1@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; старший преподаватель кафедры беспроводных технологий и систем.

Rybakov Alexey Igorevich – St. Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich; e-mail: lexeus.r1@gmail.com; St. Petersburg, Russia; senior lecturer at the Department of Wireless Technologies and Systems.

УДК 681.1 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-227-236

В.П. Федосов, А.В. Циркуленко

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ MIMO-OFDM К АКТИВНЫМ ПОМЕХАМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ

Современные системы связи часто работают в условиях сложной помехово-сигнальной обстановки, при этом существуют разные способы уменьшения ошибки восстановленного сигнала. Часть способов касается непосредственно математических алгоритмов обработки в приемнике, таких, однако есть и другие подходы, основанные на пространственной фильтрации сигналов. В частности, в последние годы активно получил развитие подход, основанный на весовой обработке сигналов, полученных с разных антенн, с использованием корреляционной матрицы входного сигнала, что позволяет более эффективно использовать информацию с антенн за счет выбора

антенны с максимальным уровнем полезного сигнала и более низкими уровнями шумов и помех, что представляет собой физически формирование эквивалентной диаграммы направленности приемной антенной решетки с максимумом на путь с максимальным уровнем полезного сигнала и минимумами на другие. Применение этого подхода представляет практический интерес, особенно в системах с наличием активных помех, например, от станций радиоэлектронной борьбы, так как способно повысить качество восстановления сигнала. Отдельно следует отметить, что в случае наличия активных помех для выбора собственного вектора для весовой обработки следует использовать метод, основанный на минимуме среднеквадратической ошибке восстановления пилот-тонов (что возможно в OFDM), так как в случае выбора максимального собственного числа неизвестно – оно будет являться сигнальным или помеховым в случае ее большого уровня. В настоящей работе приводится экспериментальное исследование адаптивного алгоритма обработки пространственно-временных сигналов для системы связи MIMO-OFDM с различными уровнями активной помехи от станции радиоэлектронной борьбы (РЭБ). При этом эксперименты проводятся как в нисходящем (Downlink, от базовой станции к мобильной), так и восходящем (Uplink, от мобильной станции к базовой станции) канале с применением адаптации как на стороне БС, так и на стороне МС, и обоих. Показано, что применение алгоритма способно улучшить качество обработки сигнала и снизить уровень вероятности ошибки битов (BER – bit error rate) для широкого диапазона отношений сигнал-шум (SNR – signal-to-noise ratio) даже при неидеальной оценке канала (по пилот-поднесущим).

MIMO (Multiple Input Multiple Output); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); активная помеха, алгоритм адаптации; станция РЭБ, восходящий канал; нисходящий канал; пространственно-временная обработка.

V.P. Fedosov, A.V. Tsirkulenko

STUDY OF THE STABILITY OF THE MIMO-OFDM SYSTEM TO ACTIVE INTERFERENCE USING AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR PROCESSING SPATIAL-TEMPORAL SIGNALS

Modern communication systems often operate in a complex interference and signaling environment, while there are various ways to reduce the error of the restored signal. Some of the methods relate directly to mathematical processing algorithms in the receiver, however, there are other approaches based on spatial filtering of signals. In particular, in recent years, an approach based on the weighted processing of signals received from different antennas has been actively developed using the correlation matrix of the input signal, which makes it possible to use information from the antennas more efficiently by choosing an antenna with the maximum level of useful signal and lower levels of noise and interference, which is physically the formation of an equivalent radiation patterns of the receiving antenna array with a maximum on the path with the maximum level of the useful signal and minima on others. The application of this approach is of practical interest, especially in systems with active interference, for example, from electronic warfare stations, as it can improve the quality of signal recovery. Separately, it should be noted that in the case of active interference, a method based on the minimum RMS error of restoring the pilot tones should be used to select the eigenvector for weight processing (which is possible in OFDM), since if the maximum eigenvalue is selected, it is unknown whether it will be signaling or interfering if it is high. This paper presents an experimental study of an adaptive algorithm for processing spatiotemporal signals for a MIMO-OFDM communication system with different levels of active interference from an electronic warfare (EW) station. In this case, experiments are carried out both in the descending (Downlink, from the base station to the mobile) and ascending (Uplink, from the mobile station to the base station) channel using adaptation on both the BS and MS sides, and both. It is shown that the application of the algorithm can improve the quality of signal processing and reduce the bit error rate for a wide range of signal–to-noise ratios (SNR – signal-to-noise ratio), even with imperfect channel estimation (by pilot tones).

MIMO (Multiple Input Multiple Output); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); active interference, adaptation algorithm, electronic warfare station, uplink; downlink; space-time processing.

Введение. В современном мире активно происходит развитие сетей связи нового поколения (5G и 6G), при этом возрастают и потребности в скорости и объеме передаваемой информации. При этом из-за ограниченности текущего радиочастотного спектра старые подходы, основанные на увеличении скорости за счет увеличения полезной составляющей спектра, уже не могут быть применимы. Другая проблема применения со-

временных систем связи – сложная помехово-сигнальная обстановка и условия распространения сигнала (например, плотная городская застройка с множеством высотных зданий). Это приводит к тому, что при передаче сигнала возникают такие явления, как:

Замирания, которые вызваны интерференцией из-за многопутного (multipath) распространения сигнала [1–11], при этом они могут быть медленными (из-за затухания сигнала на больших расстояниях) или быстрыми (из-за движения приемника или отражающих объектов вокруг).

Межсимвольная интерференция (ISI, Inter-Symbol Interference), которая возникает из-за многопутного распространения сигнала, когда отраженные копии сигнала приходят с задержкой и накладываются друг на друга, ухудшая качество приема.

Допплеровский сдвиг, который вызван движением передатчика или приемника, приводит к изменению частоты сигнала и искажениям, особенно в мобильных системах связи.

Поглощение и рассеяние, которые возникают, когда сигнал ослабляется при прохождении через различные среды (дождь, туман, здания, деревья и т.д.), что уменьшает его мощность на приемной стороне.

Шумы и помехи, которые могут быть вызваны как естественными источниками (атмосферные и космические шумы), так и техногенными (работа других электронных устройств, перекрестные помехи, интермодуляционные искажения).

Все эти явления ведут к тому, что происходит значительное ухудшение качества связи. Современный способ бороться с этими явлениями – применение систем связи с OFDM, который за счет ортогональности поднесущих, их высокой плотности и циклических префиксов позволяет частично компенсировать их [12]. Также применение OFDM дает возможность к более точной оценке канала за счет применения пилот-поднесущих.

Описание работы системы. Радиосигнал распространяется в воздушной среде в условиях плотной городской застройки [13, 14]. В силу этого канал обладает высокой частотной селективностью из-за многочисленных переотражений. Помеха представляет собой комплексный гауссовский шум с заданным INR. Система связи OFDM моделируется согласно рис. 1.

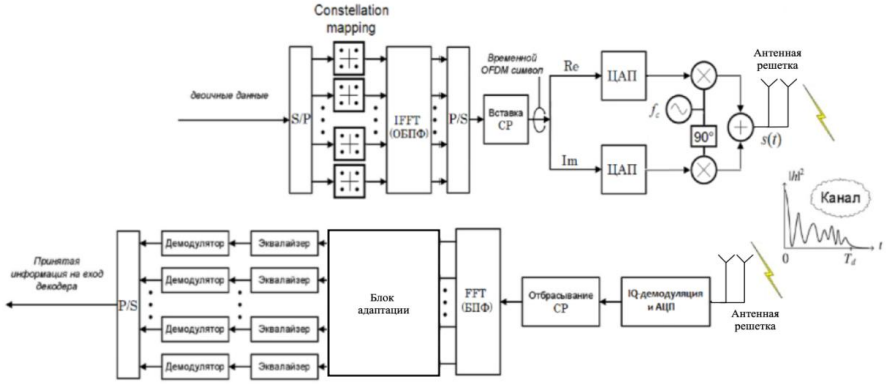


Рис. 1. Система связи с OFDM

Рассмотрим работу этой системы связи [15]. Исходные двоичные данные преобразуются из последовательного кода в параллельный (число параллельных потоков равно общему числу поднесущих). Затем, используя сигнальное созвездие соответствующего вида модуляции (код Грея), битовый поток превращается в поток комплексных чисел. При этом часть поднесущих заполняется так называемыми пилот-тонами. Пилот-тоны – это такие части сигнала, значения которых известны заранее, и которые используются потом для оценки канала. Пример возможного расположения пилот-поднесущих на частотно-временной OFDM-матрице сигнала представлен на рис. 2.

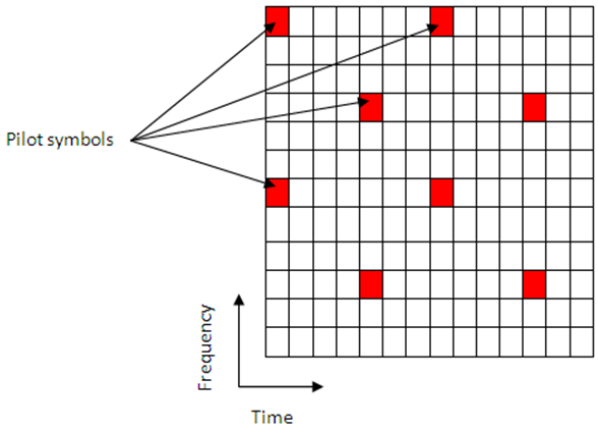


Рис. 2. Вариант расположения пилот-поднесущих в частотно-временной матрице сигнала

К полученному комплексному сигналу применяется обратное преобразование Фурье, таким образом, получается сигнал во временной области. Затем к этому сигналу добавляются так называемые циклические префиксы – копии последних элементов блока, которая вставляется в начало передаваемого сигнала OFDM, за счет их вставки отраженные и задержанные копии сигнала попадают в область префикса и не влияют на полезную часть данных. После этого готов цифровой сигнал для последующего цифро-аналогового преобразования и переноса на высокую частоту для излучения антенной решеткой передатчика базовой станции по нисходящему каналу.

Сам сигнал проходит через канал связи, которые обладает частотной и временной селективностью [16]. В рамках исследования принимается допущение, что канал связи достаточно стационарен, и за время прохождения сигнала от базовой станции к мобильной и обратно меняется незначительно.

В случае частотной и временной селективности коэффициенты канальной матрицы начинают зависеть от времени и частоты поднесущей, тогда в общем виде можно записать:

$$\boldsymbol{H}(t,f) = \sum_{l=0}^{L-1} \boldsymbol{H}(t) e^{-2j\pi f \tau_l}, \quad (1)$$

где $\boldsymbol{H}(t)$ – комплексная огибающая запаздывающего сигнала для -го пути; τ_l – задержка сигнала l-го пути; f – частота; L – количество путей сигналов в канале.

Тогда сигнал, принятый на входе приемника, можно описать как:

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{H}(t,f) \cdot \boldsymbol{X} + \boldsymbol{N}, \quad (2)$$

где $\boldsymbol{X}$ – матрица сигнала с передатчика системы связи, где одна из компонент является шумовым сигналом станции РЭБ; $\boldsymbol{H}(t,f)$ – канальная матрица среды распространения, зависящая от времени и частоты; $\boldsymbol{N}$ – матрица аддитивного квази-белого гауссовского шума; $\boldsymbol{Y}$ – матрица принятого сигнал на входе приемника.

После прохождения канала происходит извлечение синфазной и квадратурной составляющей радиосигнала (путем умножения входного радиосигнала на сигнал от гетеродина и последующей фильтрацией, и выделением информационного OFDM-сигнала)

Так как места вставки циклических префиксов известны, то происходит их отбрасывание для устранения избыточности из сигнала. Затем для каждой поднесущей производится оценка матрицы канала и последующая сплайн-интерполяция с помощью пилот-тонов [17]:

$$\boldsymbol{H}' = \frac{\boldsymbol{Y}}{\boldsymbol{P}}, \quad (3)$$

где $\boldsymbol{H}'$ – оценка канальной матрицы; $\boldsymbol{P}$ – матрица значений пилот-поднесущих.

Теперь можно приступить к весовой обработке принятого сигнала с помощью адаптивного алгоритма [18, 19]. Для этого необходимо получить оценку корреляционной матрицы принятого сигнала на выходах антенной решетки (АР):

$$\boldsymbol{R} = \frac{\boldsymbol{Y} \cdot \boldsymbol{Y}^{\boldsymbol{T}}}{N_{used}}, \quad (4)$$

где N_{used} – число поднесущих исходного сигнала OFDM.

А затем вычислить матрицу собственных значений и собственных векторов через Эйлерово разложение матрицы:

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{V} \cdot \boldsymbol{\Lambda} \cdot \boldsymbol{V}^{\boldsymbol{H}}, \quad (5)$$

где $\boldsymbol{V}$ – матрица собственных векторов пространственной корреляционной матрицы; $\boldsymbol{\Lambda}$ – матрица её собственных чисел.

Именно здесь и возникает проблема, связанная с оценкой необходимого собственного числа. Если уровень шума (INR) будет достаточно большим, то в случае выбора максимального собственного числа по амплитуде оно может быть обусловлено помеховым процессом, а не сигналом, и тогда будет выбран неверный собственный вектор, и весовая обработка будет осуществлена некорректно [20, 21].

По этой причине следует применять критерий минимальной среднеквадратической ошибки (СКО или MSE – mean squared error) воспроизведения пилот-поднесущих, тогда будет очевидно, что нужно выбирать то собственное число, для которого эта ошибка будет минимальна, что будет соответствовать лучшему выбору пути передачи сигнала [22]. Тогда можно сформировать сигнал после весовой обработки соответствующим собственным вектором:

$$\boldsymbol{Y}' = \boldsymbol{V}[id_{min}]^T \cdot \boldsymbol{Y}, \quad (6)$$

Далее выполняется формирование MMSE-оценки (minimum mean squared error) [23–25] переданного сигнала из принятого по формулам:

$$\boldsymbol{X}' = \boldsymbol{Y} \cdot \boldsymbol{W}_{\boldsymbol{MMSE}}, \quad (7)$$

$$\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{MMSE}} = (\sigma_n^2 \cdot \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{Ntx}} + \boldsymbol{H}^{\boldsymbol{H}} \cdot \boldsymbol{H})^{-1} \boldsymbol{H}^{\boldsymbol{H}}, \quad (8)$$

где σ_n^2 – дисперсия шума; $\boldsymbol{I}_{\boldsymbol{Ntx}} -$ единичная матрица размера $N_{tx} \times N_{tx}$; $\boldsymbol{H}^{\boldsymbol{H}}$ – сопряженно-транспонированная (эрмитова) матрица H.

Затем из полученной оценки необходимо получить поток битов путем демодуляции по соответствующему сигнальному созвездию (в данном исследование рассматривается так называемое «жесткое» решение – когда принятые символы модуляции округляются до ближайших символов созвездия), и восстановить последовательный поток из параллельного.

В конце происходит подсчет частоты ошибки битов.

Моделирование. Итоговая оценка частоты ошибки битов производилась путем усреднения по M реализациям для снижения дисперсии ошибки. В моделировании исследовалась система связи со следующими параметрами:

$N_{tx} = 4 -$ число передающих антенн; $N_{rx} = 4 -$ число приемных антенн; $N_{sym} = 6 -$ число символов во временной области; $N_{used} = 192 -$ число поднесущих; $N_p = 48 -$ число пилот-поднесущих; $N_{FFT} = 1024 -$ число точек FFT; $SNR = 0 \ldots 20$ дБ $-$ исследуемые отношения сигнал-шум; $INR = -25 \; -10,5$ дБ $-$ исследуемые отношения помеха-шум; $BPSK -$ вид модуляции; $M = 1000 -$ число усреднений; $N_{path} = N_{rx} -$ число путей в канале;

В качестве антенны использовалась антенная решетка с расстоянием между элементами $\frac{\lambda}{2}$, и $\lambda = 0{,}03$ м.

Канал – время- и частотно-селективный многопутный с многочисленными переотражениями, плотная городская застройка, воздушная среда, есть компонента прямой видимости.

Моделирование было проведено на языке Matlab [17].

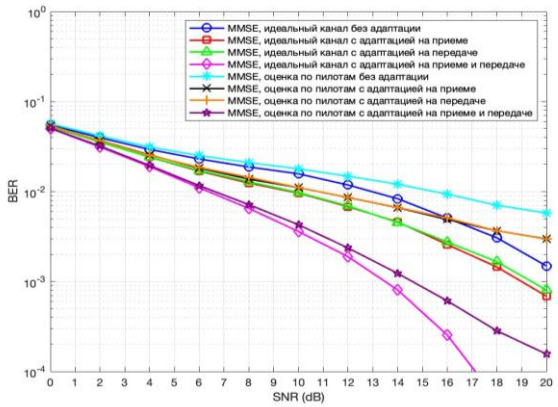


Рис. 3. Усредненные вероятности ошибок битов различных комбинаций алгоритма и оценки канала при $INR = -25$ дБ

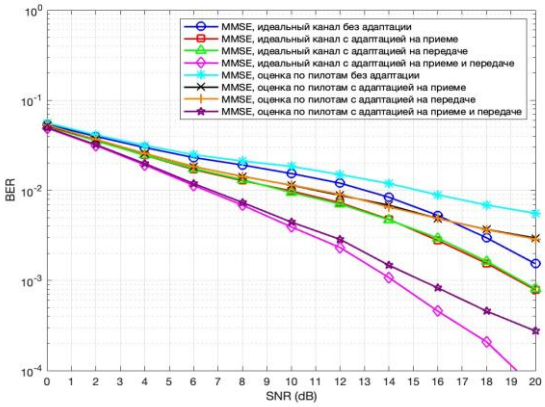


Рис. 4. Усредненные вероятности ошибок битов различных комбинаций алгоритма и оценки канала при $INR = -10$ дБ

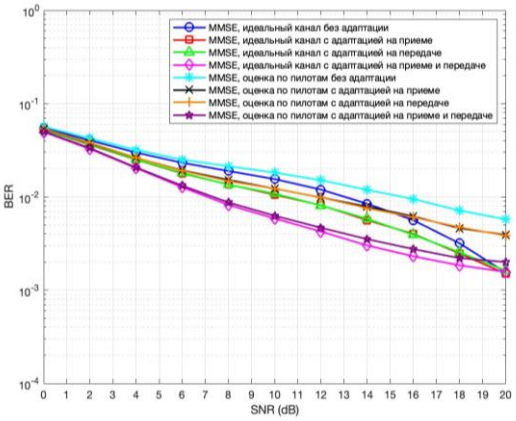


Рис. 5. Усредненные вероятности ошибок битов различных комбинаций алгоритма и оценки канала при $INR = 5$ дБ

Рассмотрим численно, какой выигрыш можно получить от применения адаптивного алгоритма. Это показано в табл. 1. В таблице показан выигрыш (путем деления ошибки без адаптации на ошибку с адаптацией – то есть во сколько раз снижается ошибка) от

применения алгоритма адаптации на приеме, передаче и при двойной адаптации на приеме и передаче по сравнению с случаем без адаптации. Для исследования возьмем фиксированное отношение сигнал-шум $SNR = 12$ дБ.

Таблица 1

Выигрыш от применения адаптивного алгоритма в разных сценариях

	Идеальный канал (прием)	Оценка по пилотам (прием)	Идеальный канал (передача)	Оценка по пилотам (передача)	Идеальный канал (двойная)	Оценка по пилотам (двойная)
-25 *дБ*	1,73	1,73	1,72	1,76	6,31	6,74
-10 *дБ*	1,71	1,66	1,65	1,70	5,18	5,24
5 *дБ*	1,47	1,54	1,47	1,51	2,75	3,18

Анализ полученных графиков и таблицы позволяет сделать вывод о том, что применение адаптивного алгоритма обработки позволяет уменьшить частоту ошибок битов даже в условиях сложного время- и частотно-селективного канала связи с многопутным распространением и наличием активных помех. При этом выигрыш от применения этого алгоритма сохраняется даже в случае положительных отношений помеха-шум, т.е., когда уровень помехи превышает уровень шума, и составляет в этом случае примерно до 2,75 раз при $SNR = 12$ дБ и до 6,74 раз с меньшим уровнем помехи.

Отдельно следует отметить, что применение двойной адаптации на приеме и передаче уменьшает частоту ошибки битов сильнее всего по сравнению со сценариями, когда адаптация происходит только на приеме или на передаче.

Таким образом, в реальных сценариях можно применять двойную адаптацию от БС к МС и обратно, чтобы улучшить качество восстановления сигнала с наибольшим выигрышем по сравнению с обычным детектором и случаями однократных адаптаций, что свидетельствует о постоянной динамической подстройке системы к изменяющимся условиям среды распространения и помехово-сигнальной обстановке.

Выводы. В ходе экспериментального исследования была проанализирована работа системы MIMO-OFDM и ее устойчивость к активных помехам. Полученные данные свидетельствуют о практической значимости полученных результатов, что позволяет использовать разработку в реальных приложениях, например, в военных системах, системах спутниковой и космической связи, гражданских БПЛА и сетях связи новых поколений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Mao Hongliang & Feng Wei & Pei Yukui & Ge Ning.* SIC based soft QRD detection for coded single carrier block transmission with unique word // GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference. – 2013. – P. 4348-4352. – 10.1109/GLOCOM.2013.6831757.
2. *Gan Ying & Ling Cong & Mow Wai Ho.* Complex Lattice Reduction Algorithm for Low-Complexity MIMO Detection // Signal Processing, IEEE Transactions on. – 2009. – 57. – P. 2701-2710. – 10.1109/TSP.2009.2016267.
3. *Guo Zhan & Nilsson Peter*. Algorithm and implementation of the K-best Sphere decoding for MIMO detection // Selected Areas in Communications, IEEE Journal on. – 2006. – 24. – P. 491-503. – 10.1109/JSAC.2005.862402.
4. *Федосов В.П., Емельяненко А.В., Гладушенко С.Г., Поморцев П.М.* Методы и алгоритмы многоканальной пространственной обработки широкополосных сигналов // Нелинейный мир. – 2012. – Т. 10, № 11. – С. 731-737.
5. *Федосов В.П., Кучерявенко С.В., Муравицкий Н.С.* Повышение эффективности радиосвязи в релеевском канале на основе антенных решеток // Антенны. – 2008. – № 11. – С. 98-104.
6. *Муравицкий Н.С., Федосов В.П.* Метод улучшения приёма в системе беспроводной передачи данных на основе антенных решеток при наличии активных помех // Тр. международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭВМ - ИРЭМВ». – Таганрог: ТТИ ЮФУ. 2009. – С. 412-515.
7. *Федосов В.П., Емельяненко А.В.* Сравнительная эффективность беспроводного доступа на основе пространственной адаптации на выходах антенной решётки при использовании MIMO-OFDM в релеевском канале связи // Антенны. – 2013. – № 10 (197). – С. 45-49.

8. *Федосов В.П., Муравицкий Н.С.* Адаптивная приемная антенная решетка для обработки пространственно-временных сигналов в MIMO-системе беспроводной передачи данных // Антенны. – 2011. – № 8. – С. 35-43.
9. *Xirouchakis I.A.* Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simula- tions A Ray Tracing Simulator Based on 3GPP TR 25.996 v. 6.1. 0 // Physics Department, University of Athens. – 2008.
10. *Fedosov V., Legin A., Lomakina A.* Adaptive algorithm based on antenna arrays for radio communication systems // Serbian Journal of Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 14, No. 3. – P. 301-312.
11. *Федосов В.П.* Алгоритмы совместной адаптации на приём и передачу в системе связи на основе антенных решёток при наличии активных помех // Известия ЮФУ. Технические науки.
12. *Федосов В.П., Терновой Д.О.* Алгоритм совместной адаптации на прием и передачу в системе связи на основе антенных решеток // Радиотехника. – 2011. – №. 9. – С. 52-55.
13. *Федосов В.П., Романов В.А.* Статистическая радиотехника: электронное учебное пособие. – Ростов-на-Дону, 2008.
14. *Fedosov V., Jameel J., and Kucheryavenko S.* Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 012131.
15. *Fedosov V.P., Jameel J.S., and Kucheryavenko S.V.* Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2021. – P. 443-446.
16. *Fedosov V., Legin A., and Lomakina A.* Algorithms based on MIMO-OFDM technology for realization of digital hydroacoustic communication channel // Izvestiya SfedU, Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 168. – P. 148-158.
17. *Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G.* MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. – John Wiley & Sons, 2010.
18. *Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V.* Three-dimensional model of hydro acoustic channel for research MIMO systems // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 9. Ocean Sensing and Monitoring IX. – 2017. – P. 101860W.
19. *Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V.* Data transmission in 3D WIMAX channel based on SISO-OFDM and MIMO-OFDM // Izvestiya SFedU. Technical science. Taganrog. – 2020. – No. 6 (216). – P. 6-18. (In Russian).
20. *Федосов В.П., Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М. Джавад, Кучерявенко С.В.* Пространственно-временной адаптивный алгоритм с использованием кода Хэмминга на основе модели беспроводного канала 3D-MIMO // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 2. – С. 113-123.
21. *Fedosov V., Jameel J., Kucheryavenko S.* Medical Image Transmission in 3D WiMAX Channel Using Adaptive Algorithm Based on MIMO-OFDM Principles // Conference Proceedings - 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2023. – 2023. – P. 236-239.
22. *Fedosov V., Lomakina A., Legin A., Voronin V.* Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels // Book Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels. International Society for Optics and Photonics. – 2016. – P. 98720G.
23. *Kucheryavenko A., Fedosov V.* Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MATLAB // MATEC Web of Conferences. – 2017. – P. 05008.
24. *Fedosov V., Legin A.* Wireless Data Transmission in Underwater Hydroacoustic Environment Based on MIMO-OFDM System and Application Adaptive Algorithm at the Receiver Side // Serbian journal of electrical engineering. – February 2019. – Vol. 16, No. 1. – P. 71-83.
25. *Федосов В.П., Джамил Д.С., Кучерявенко С.В.* Сравнение производительностей адаптивного алгоритма и метода минимума среднеквадратического отклонения для передачи изображений на основе систем связи с использованием антенных решеток // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 2. – С. 69-78.

REFERENCE

1. *Mao Hongliang & Feng Wei & Pei Yukui & Ge Ning.* SIC based soft QRD detection for coded single carrier block transmission with unique word, *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference,* 2013, pp. 4348-4352. 10.1109/GLOCOM.2013.6831757.
2. *Gan Ying & Ling Cong & Mow Wai Ho.* Complex Lattice Reduction Algorithm for Low-Complexity MIMO Detection, *Signal Processing, IEEE Transactions on,* 2009, 57, pp. 2701-2710. 10.1109/TSP.2009.2016267.
3. *Guo Zhan & Nilsson Peter*. Algorithm and implementation of the K-best Sphere decoding for MIMO detection, *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on,* 2006, 24, pp. 491-503. 10.1109/JSAC.2005.862402.

4. *Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V., Gladushenko S.G., Pomortsev P.M.* Metody i algoritmy mnogokanal'noy prostranstvennoy obrabotki shirokopolosnykh signalov [Methods and algorithms of multichannel spatial processing of broadband signals], *Nelineynyy mir* [Nonlinear World], 2012, Vol. 10, No. 11, pp. 731-737.
5. *Fedosov V.P., Kucheryavenko S.V., Muravitskiy N.S.* Povyshenie effektivnosti radiosvyazi v releevskom kanale na osnove antennykh reshetok [Improving the efficiency of radio communication in the relay channel based on antenna arrays], *Antenny* [Antennas], 2008, No. 11, pp. 98-104.
6. *Muravitskiy N.S., Fedosov V.P.* Metod uluchsheniya priema v sisteme besprovodnoy peredachi dannykh na osnove antennykh reshetok pri nalichii aktivnykh pomekh [Method of improving reception in a wireless data transmission system based on antenna arrays in the presence of active interference], *Tr. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izluchenie i rasseyanie EVM - IREMV»* [Proceedings of the international scientific conference "Radiation and scattering of computers - IREMV"]. Taganrog: TTI YuFU, 2009, pp. 412-515.
7. *Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V.* Sravnitel'naya effektivnost' besprovodnogo dostupa na osnove prostranstvennoy adaptatsii na vykhodakh antennoy reshetki pri ispol'zovanii MIMO-OFDM v releevskom kanale svyazi [Comparative efficiency of wireless access based on spatial adaptation at antenna array outputs when using MIMO-OFDM in a relay communication channel], *Antenny* [Antennas], 2013, No. 10 (197), pp. 45-49.
8. *Fedosov V.P., Muravitskiy N.S.* Adaptivnaya priemnaya antennaya reshetka dlya obrabotki prostranstvenno-vremennykh signalov v MIMO-sisteme besprovodnoy peredachi dannykh [Adaptive receiving antenna array for processing space-time signals in a MIMO wireless data transmission system], *Antenny* [Antennas], 2011, No. 8, pp. 35-43.
9. *Xirouchakis I.A.* Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simula- tions A Ray Tracing Simulator Based on 3GPP TR 25.996 v. 6.1. 0, *Physics Department, University of Athens,* 2008.
10. *Fedosov V., Legin A., Lomakina A.* Adaptive algorithm based on antenna arrays for radio communication systems, *Serbian Journal of Electrical Engineering,* 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 301-312.
11. *Fedosov V.P.* Algoritmy sovmestnoy adaptatsii na priem i peredachu v sisteme svyazi na osnove antennykh reshetok pri nalichii aktivnykh pomekh [Algorithms for joint adaptation to reception and transmission in a communication system based on antenna arrays in the presence of active interference], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences].
12. *Fedosov V.P., Ternovoy D.O.* Algoritm sovmestnoy adaptatsii na priem i peredachu v sisteme svyazi na osnove antennykh reshetok [Algorithm of joint adaptation to reception and transmission in a communication system based on antenna arrays], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2011, No. 9, pp. 52-55.
13. *Fedosov V.P., Romanov V.A.* Statisticheskaya radiotekhnika: elektronnoe uchebnoe posobie [Statistical radio engineering: an electronic teaching aid]. Rostov-on-Donu, 2008.
14. *Fedosov V., Jameel J., and Kucheryavenko S.* Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles, *Journal of Physics: Conference Series,* 2021, pp. 012131.
15. *Fedosov V.P., Jameel J.S., and Kucheryavenko S.V.* Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2021. – P. 443-446.
16. *Fedosov V., Legin A., and Lomakina A.* Algorithms based on MIMO-OFDM technology for realization of digital hydroacoustic communication channel, *Izvestiya SfedU, Engineering Sciences,* 2015, Vol. 168, pp. 148-158.
17. *Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G.* MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. – John Wiley & Sons, 2010.
18. *Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V.* Three-dimensional model of hydro acoustic channel for research MIMO systems, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 9. Ocean Sensing and Monitoring IX,* 2017, pp. 101860W.
19. *Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V.* Data transmission in 3D WIMAX channel based on SISO-OFDM and MIMO-OFDM, *Izvestiya SFedU. Engineering*, 2020, No. 6 (216), pp. 6-18. (In Russian).
20. *Fedosov V.P., Al'-Musavi Visam Mokhammedtaki M. Dzhavad, Kucheryavenko S.V.* Prostranstvenno-vremennoy adaptivnyy algoritm s ispol'zovaniem koda Khemminga na osnove modeli bes-provodnogo kanala 3D-MIMO [A space-time adaptive algorithm using a Hamming code based on a 3D-MIMO wireless channel model], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2024, Vol. 88, No. 2, pp. 113-123.
21. *Fedosov V., Jameel J., Kucheryavenko S.* Medical Image Transmission in 3D WiMAX Channel Using Adaptive Algorithm Based on MIMO-OFDM Principles, *Conference Proceedings - 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2023,* 2023, pp. 236-239.
22. *Fedosov V., Lomakina A., Legin A., Voronin V.* Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels, *Book Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels. International Society for Optics and Photonics,* 2016, pp. 98720G.

23. *Kucheryavenko A., Fedosov V.* Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MATLAB, *MATEC Web of Conferences,* 2017, pp. 05008.
24. *Fedosov V., Legin A.* Wireless Data Transmission in Underwater Hydroacoustic Environment Based on MIMO-OFDM System and Application Adaptive Algorithm at the Receiver Side, *Serbian journal of electrical engineering,* February 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 71-83.
25. *Fedosov V.P., Dzhamil D.S., Kucheryavenko S.V.* Sravnenie proizvoditel'nostey adaptivnogo algoritma i metoda minimuma srednekvadraticheskogo otkloneniya dlya peredachi izobrazheniy na osnove sistem svyazi s ispol'zovaniem antennykh reshetok [Comparison of the performance of the adaptive algorithm and the method of minimum standard deviation for image transmission based on communication systems using antenna arrays], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2023, Vol. 87, No. 2, pp. 69-78.

Федосов Валентин Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; профессор.

Циркуленко Артемий Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: acirkulenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Fedosov Valentin Petrovich – Southern Federal University; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; professor.

Tsirkulenko Artemy Viktorovich – Southern Federal University; almusavi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; postgraduate student.

Раздел IV. Машинное обучение и нейронные сети

УДК 007.52 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-237-250

З. Ахмад, Ю.А. Кравченко, А.М. Мансур

ОПТИМИЗАЦИЯ ПИД-ПАРАМЕТРОВ СЕРВОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА И НЕЙРОСЕТЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА

Алгоритмы машинного обучения играют жизненно важную роль в повышении производительности промышленных систем, обеспечивая высокую точность и операционную эффективность в режиме реального времени. В системах управления серводвигателями эти алгоритмы способствуют снижению шума и вибраций, что повышает эффективность работы и продлевает срок службы оборудования. В данной статье рассматриваются различные типы возникающих шумов и их негативное воздействие на промышленные процессы. Основной целью исследования является оптимизация параметров ПИД-регулятора (PID) в сервосистемах с использованием комбинированного алгоритма, сочетающего нейронные сети и генетические алгоритмы. В отличие от традиционных методов, таких как генетические алгоритмы (GA) и метод роя частиц (PSO), которые отличаются медленной сходимостью и риском повреждения двигателей, предложенное решение основано на программной платформе управления. Эта платформа обеспечивает безопасное взаимодействие с серводвигателем в режиме реального времени. Разработана система управления на основе CAN Bus, которая позволяет разработчикам: считывать все параметры серводвигателя (скорость, ток, напряжение, положение энкодера); изменять коэффициенты ПИД-регулятора одним нажатием, исключая необходимость ручной настройки, как в MOTO-MASTER. Применение разработанной системы управления позволило использовать обученный нейронный классификатор для ограничения параметров PID в безопасных пределах, что сокращает пространство поиска и ускоряет процесс оптимизации. Экспериментальные результаты на серводвигателях SPH-S показали значительное снижение шума и механических вибраций при работе в реальном времени, с сохранением стабильности в широком диапазоне скоростей (0–1500 об/мин).

Машинное обучение; Настройка ПИД-регуляторов; двигатель СПШ; сервопривод; MLP-классификатор; эволюционные алгоритмы; оптимизация параметров.

Z. Ahmad, Yu.A. Kravchenko, A.M. Mansour

OPTIMIZATION OF PID PARAMETERS OF SERVO SYSTEMS USING A GENETIC ALGORITHM AND A NEURAL NETWORK CLASSIFIER

Machine learning algorithms play a vital role in enhancing the performance of industrial systems, providing high precision and operational efficiency in real time. In servo motor control systems, these algorithms help reduce noise and vibration, improving efficiency and extending equipment lifespan. This article examines various types of noise that occur and their negative impact on industrial processes. The primary research objective is to optimize PID controller parameters in servo systems using a combined algorithm that combines neural networks and genetic algorithms. Unlike traditional methods such as genetic algorithms (GA) and particle swarm optimization (PSO), which suffer from slow convergence and risk of motor damage, the proposed solution is based on a control software platform. This platform ensures safe real-time interaction with the servo motor. A CAN Bus-based control system has been developed that enables developers to: read all servo motor parameters (speed, current, voltage, encoder position); modify PID coefficients with a single click, eliminating the need for manual tuning as in MOTO-MASTER. The implementation of the developed control system allowed the use of a trained neural classifier to constrain PID parameters within safe limits, reducing search space and accelerating the optimization process. Experimental results on SPH-S servo motors demonstrated significant reduction in noise and mechanical vibrations during real-time operation while maintaining stability across a wide speed range (0-1500 rpm).

Machine learning; PID controller tuning; SPSh motor; servo drive; MLP classifier; evolutionary algorithms; parameter optimization.

Введение. Пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы остаются краеугольным камнем промышленных систем управления движением, при этом только рынок сервоприводов оценивается в $12,8 млрд. Эти прецизионные исполнительные устройства используются в критически важных задачах – от роботизированной сборки до систем возобновляемой энергетики, где точная настройка ПИД-параметров напрямую влияет на энергоэффективность и производительность. Однако сохраняется общеотраслевая проблема сохранения баланса между точностью настроек и вычислительными затратами, особенно в условиях требований к реактивности современных электромеханических систем в реальном масштабе времени и эксплуатационной безопасности [1, 2].

Традиционные метаэвристические методы, такие как генетические алгоритмы (ГА) и оптимизация роем частиц (ОРЧ), расширили возможности ПИД-оптимизации за счет исследования сложных пространств параметров. Их внедрение в промышленные системы автоматизации позволило повысить точность обработки на станках с ЧПУ, улучшить энергосбережение в конвейерных системах и стабилизировать роботизированные манипуляторы. Однако их стохастическая природа создает критические уязвимости, где неконтролируемый поиск параметров угрожает дестабилизацией двигателя, а ненаправленный поиск тратит 34–61% вычислительных ресурсов на неприемлемые решения, согласно последним исследованиям [3, 4].

При использовании ОРЧ (PSO) или ГА для настройки ПИД слишком широкие диапазоны поиска могут привести к нестабильности системы или зашумленности в ходе оптимизации. Это происходит из-за необходимости тестировать даже заведомо неустойчивые комбинации ПИД -параметров для оценки их эффективности. Временная дестабилизация проявляется тремя способами.

Во-первых, на этапе случайного исследования неизбежно проверяются проблемные параметры. Чрезмерный пропорциональный коэффициент (КП) вызывает перерегулирование, высокий дифференциальный коэффициент (КД) усиливает сенсорный шум, а неограниченный интегральный коэффициент (КИ) провоцирует насыщение интегратора. Во-вторых, при оценке целевой функции каждый набор параметров тестируется на реальной производительности. Неустойчивые параметры генерируют высокие метрики затрат (например, перерегулирование) перед отбраковкой. В-третьих, влияние существенно различается между моделированием и реальной системой. Если моделирование безопасно допускает исследовательскую нестабильность, это замедляет сходимость и сталкивается с фундаментальными ограничениями. Не все двигатели могут быть точно описаны математически (1), а имитация не учитывает динамику и нелинейности реальных систем [5, 6].

Взаимосвязанный характер этих эффектов демонстрирует важность использования методов оптимизации с ограничениями по безопасности для систем управления сервоприводами [7]. В рамках данного исследования разрабатывается гибридный генетический алгоритм, предназначенный для подавления шумов в сервоприводах типа СПШ [8, 9], возникающих из-за случайных начальных значений, генерируемых традиционными генетическими алгоритмами при поиске оптимальных ПИД-параметров.

В качестве тестового образца используется сервопривод СПШ – интегрированная сервосистема на основе гибридного шагового двигателя, применяющая векторное управление со специально адаптированным алгоритмом для шаговых двигателей (рис. 1).

Ручная настройка ПИД-параметров возможна через интерфейс программного обеспечения Moto-Master, разработанного производителем сервопривода СПШ. Однако данные системы обладают рядом существенных ограничений: жёстко заданной структурой управления со специализированными алгоритмами и ограниченными возможностями внешней корректировки параметров управления. Эти технические ограничения существенно затрудняют автоматическую оптимизацию ПИД-параметров и улучшение динамических характеристик системы.

Поскольку данный сервопривод изначально разработан как система с жёстко замкнутым контуром управления, он не предусматривает возможность встраивания алгоритмов оптимизации непосредственно в свою архитектуру. Поэтому, для интеграции оптимизационных алгоритмов был создан специальный внешний управляющий модуль, который взаимодействует с сервоприводом СПШ через промышленный протокол CAN.

Рис. 1. Структурная схема встроенного сервопривода СПШ

Ключевое преимущество нашего решения заключается в организации двустороннего обмена данными. Через CAN-интерфейс система в реальном времени получает информацию от сервопривода и передаёт скорректированные параметры управления. При этом используется следующий алгоритм работы: во-первых, модуль MOTO-MASTER непрерывно мониторит текущие характеристики системы; во-вторых, на основе этих данных динамически пересчитываются оптимальные параметры; в-третьих, они немедленно применяются для коррекции работы привода. Особое внимание уделяется анализу переходных процессов, который включает четыре ключевых параметра: процент перерегулирования; время нарастания сигнала; время выхода на установившийся режим; величину статической ошибки.

Таким образом, предложенное решение сохраняет все преимущества традиционной замкнутой системы управления (прежде всего, её надёжность), одновременно добавляя гибкость и адаптивность, характерные для открытых архитектур. Основные результаты исследования:

1. Система управления, обеспечивающая безопасное взаимодействие с серводвигателем СПШ, позволяющая как настраивать параметры ПИД в реальном времени, так и собирать комплексные данные через встроенные библиотечные функции нашего управляющего программного обеспечения.

2. Модифицированный генетический алгоритм с нейросетевым фильтром безопасности, где классификатор определяет безопасные рабочие границы, полностью исключая опасные комбинации параметров, при этом сохраняя все пространство возможных решений.

1. Сравнительный анализ методов оптимизации ПИД-регуляторов в шумовых условиях. Если параметры ПИД-регулятора настроены неправильно, могут возникнуть негативные эффекты, приводящие к ухудшению стабильности и производительности сервоприводов постоянного тока [10, 11]. Ниже приведено подробное описание этих эффектов:

1. *Колебания и неустойчивость*. Неоптимальные значения ПИД-параметров вызывают чрезмерную реакцию системы на изменения настроек. Это приводит к значительным колебаниям вокруг целевой скорости из-за завышенных коэффициентов усиления. Высокий пропорциональный коэффициент (*Кп*) увеличивает реактивность системы до уровня, при котором двигатель превышает целевую скорость, чередуя резкие ускорения и торможения. Такие колебания провоцируют механический износ и могут привести к повреждению двигателя при длительной эксплуатации.

2. *Усиление шума и вибраций*. Некорректная настройка дифференциальной составляющей (*Кд*) усиливает высокочастотный шум в системе. Поскольку дифференциальное действие предназначено для компенсации изменений во времени (а не шума), завышенное *Кд* вызывает повышенную чувствительность к шуму и нестабильную работу двигателя с непредсказуемыми колебаниями скорости и вибрациями.

3. *Статическая ошибка*. Неправильный интегральный коэффициент (*Ки*) приводит к двум сценариям. Слишком низкое *Ки*: система не устраняет ошибку со временем, сохраняя постоянное расхождение между заданной и фактической скоростью. Слишком высокое *Ки*: возникает неустойчивость, вызывающая колебания вокруг уставки.

Формы шума в отклике скорости сервопривода. Шум в отклике скорости сервопривода проявляется в двух основных формах. Первый – это фоновый шум, включающий случайные электрические помехи и внешние возмущения. При неоптимальных

настройках ПИД-регулятора система неспособна эффективно фильтровать такие помехи, что приводит к нестабильной работе двигателя. Второй тип шума – это гармонические искажения. Они возникают, когда неправильно подобранные параметры регулятора вызывают появление в скоростном отклике паразитных частот, несвязанных с основной гармоникой, что создает сложные вибрационные картины [12, 13]. Такие шумовые эффекты приводят к четырем основным негативным последствиям: (1) снижению точности позиционирования из-за колебаний скорости; (2) ускоренному износу механических компонентов вследствие постоянных динамических нагрузок; (3) повышенному энергопотреблению из-за необходимости частых корректирующих воздействий; (4) риску возникновения разрушительного механического резонанса при совпадении частот колебаний с собственными частотами элементов системы. Совокупное действие этих факторов значительно ухудшает как производительность, так и надежность сервоприводной системы в целом.

Основные подходы к снижению шума. Существуют два основных метода минимизации влияния шума при оптимизации параметров ПИД-регуляторов:

Первый метод – оптимизация в реальном времени (онлайн) с прямым взаимодействием с сервоприводом, где алгоритм подвергается воздействию измеряемого шума, внешних возмущений и неопределенности процесса. Снижение шума в этом подходе достигается за счёт многократных тестов с усреднением результатов, когда каждый набор ПИД-параметров тестируется несколько раз для нивелирования случайных помех. Также применяются робастные целевые функции, устойчивые к выбросам, такие как штрафы за перерегулирование или нестабильность, и используется фильтрация данных с помощью фильтров Калмана для отделения полезного отклика системы от шума.

Второй метод – оптимизация на основе моделирования (оффлайн), где алгоритм настраивает ПИД-параметры на виртуальной модели двигателя, исключая риски для оборудования. Этот подход включает встроенное моделирование шума с имитацией реальных возмущений, таких как температурные дрейфы и вибрации, для проверки устойчивости решений. Оценка параметров проводится при различных шумовых сценариях с разными начальными условиями генератора шума, что обеспечивает стабильность решений. Кроме того, массовое тестирование вариантов в симуляции с использованием параллельных вычислений значительно ускоряет поиск робастных решений.

Оба подхода (онлайн и оффлайн оптимизация) имеют свои сильные и слабые стороны. Что касается онлайн-методов (в реальном времени), то они сталкиваются с рядом существенных ограничений. Во-первых, многократные тесты для усреднения шума значительно увеличивают время оптимизации, особенно для сложных систем. Во-вторых, они чувствительны к внешним воздействиям, таким как температура и вибрации, которые могут искажать результаты или создавать ложные положительные оценки. Кроме того, интенсивное тестирование в реальных условиях ускоряет износ оборудования, а высокий уровень шума может привести к преждевременной сходимости алгоритма, застреванию в локальных оптимумах, которые не могут быть учтены при изменении условий.

Оффлайн-методы (на основе моделирования), также имеют свои недостатки. Их эффективность ограничена точностью модели и её соответствием реальной системе, включая динамику и шумовые характеристики. Параметры, оптимизированные под искусственные помехи, часто оказываются неработоспособными при реальном шумовом профиле. Кроме того, такие методы страдают от низкой адаптивности, потому что физическая система со временем меняется из-за износа и внешних факторов, но имитация не учитывает эти изменения без постоянного обновления модели.

В данном исследовании применяется метод снижения шумов в реальном масштабе времени с использованием генетических алгоритмов для решения задачи оптимизации, при этом предлагается решение, позволяющее поддерживать параметры ПИД-регуляторов в безопасных пределах, защищающих серводвигатель от повреждений.

Опишем постановку решаемой задачи оптимизации, после чего представим описание разработанной системы и предложенных решений.

2. Постановка задачи оптимизации ПИД-параметров сервосистем. Пусть даны: $\mathcal{G}$ – классический генетический алгоритм; $\mathcal{HG}$ – предлагаемый гибридный генетический алгоритм; $\mathcal{P} = \{K_p, K_i, K_d\} \in \mathbb{R}^3$ – параметры ПИД-регулятора; $\boldsymbol{\mathcal{N}}(\mathcal{P})$ – функция уровня шума для параметров $\mathcal{P}$ в сервоприводах типа СПШ; $\mathcal{J}(\mathcal{P}) = \mathbb{E}[\boldsymbol{\mathcal{N}}(\mathcal{P})]$ – целевая функция (ожидаемый уровень шума). Формулировка задачи оптимизации:

$$\mathcal{P}^* = \operatorname{argmin} \mathcal{J}(\mathcal{P}),\ \mathcal{P} \in \boldsymbol{\mathcal{F}}, \tag{1}$$

где $\boldsymbol{\mathcal{F}} \subset \mathbb{R}^3$ – пространство допустимых параметров; $\mathcal{G}$ генерирует начальные решения $\mathcal{P}_0$ с $\boldsymbol{\mathcal{N}}(\mathcal{P}_0) > \boldsymbol{\mathcal{N}}_\text{порог}$; $\mathcal{HG}$ модифицирует $\mathcal{G}$ для генерации $\mathcal{P}_0'$ с $\boldsymbol{\mathcal{N}}(\mathcal{P}_0') \le \boldsymbol{\mathcal{N}}_\text{порог}$. Предложенный алгоритм $\mathcal{HG}$ улучшает сходимость:

$$\lim_{k\to\infty} \boldsymbol{\mathcal{N}}(\mathcal{P}_k) < \lim_{k\to\infty} \boldsymbol{\mathcal{N}}(\mathcal{P}_k), \tag{2}$$

Для решения поставленной задачи была разработана внешняя система для интеллектуального управления серводвигателем, отличающаяся использованием интегрированного протокола CAN, позволяющая в режиме реального времени считывать, регулировать и обрабатывать рабочие параметры.

Следующий пункт описывает архитектуру предлагаемой системы управления и способ её применения для интеграции решений поставленной задачи на основе методов машинного обучения.

3. Архитектура внешней системы управления. Структура внешней системы управления серводвигателя, интегрируемой с сервоприводом, включает следующие компоненты [14]:

- Raspberry Pi 3 – выполняет функции контроллера движения;
- Микросхема MCP2515 – подключается к Raspberry Pi через SPI (последовательный периферийный интерфейс) и обеспечивает автономное управление CAN-шина, а также совместимость со спецификацией CAN 2.0B для связи с сервоприводами (рис. 2).

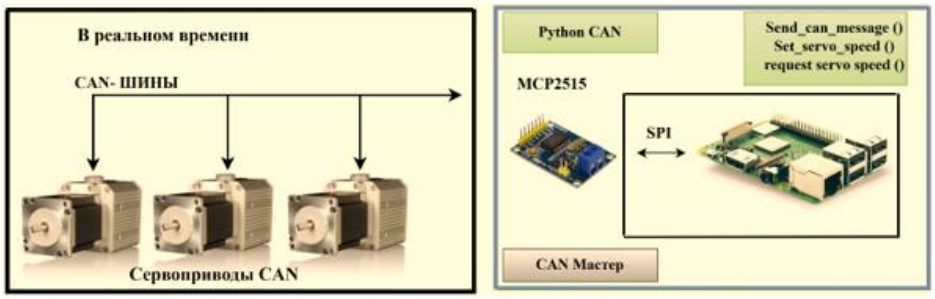


Рис. 2. Структурная модель системы управления сервоприводами

Контроллер движения CAN-привода построен на основе ARM-микрокомпьютера с операционной системой Linux. Архитектура системы включает программно-аппаратные компоненты, обеспечивающие взаимодействие с сервоприводами.

CAN-мастер, реализованный на языке Python для платформы Raspberry Pi 3, выступает центральным звеном системы. Он обеспечивает связь между контроллером движения и приводами через CAN-шину, формирует управляющие пакеты и передаёт их на приводы, а также принимает ответные пакеты (рис. 3).

Параметризация приводов выполняется с использованием технического протокола CAN, позволяющего считывать и устанавливать настройки. Этот процесс осуществляется в пошаговом режиме с низкой скоростью обмена данными, что исключает необходимость высокочастотной коммуникации на этапе конфигурации.

Программная реализация системы основана на библиотеке *PythonCAN*[1] – открытом сетевом стеке и наборе драйверов для работы с CAN-устройствами в среде Linux. Ключевой элемент – функция send_can_message(), которая выполняет следующие операции:

- инициализирует CAN-сокет (по аналогии с TCP/IP);
- привязывает интерфейс для чтения и записи данных;
- формирует CAN-сообщения (структура CAN_MSG) для управления сервоприводами СПШ.

Библиотека *PythonCAN* поддерживает модель сетевого устройства, обеспечивающую одновременный доступ нескольких приложений к одному CAN-устройству, а также работу с несколькими CAN-сетями в рамках одного приложения. Её интеграция с ядром Linux позволяет напрямую взаимодействовать с аппаратными ресурсами.

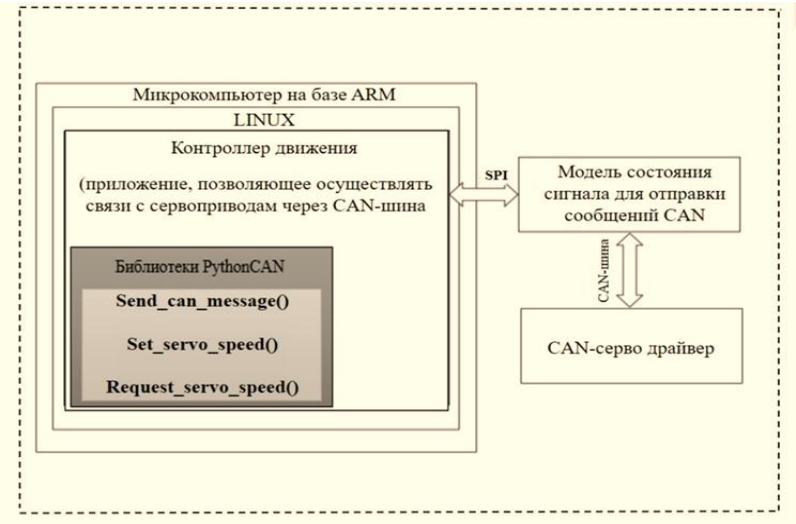


Рис. 3. Структура программных компонентов CAN-контроллера движения

Разработанная внешняя система управления обладает рядом ключевых особенностей, обеспечивающих ее эффективность и универсальность. Прежде всего, она отличается совместимостью, гарантируя бесперебойный обмен данными между системами через CAN-протокол. Важной характеристикой является адаптивность, позволяющая вносить внешние улучшения в алгоритмы управления без необходимости модификации базовой архитектуры закрытой части.

Особое внимание уделено оптимизации производительности, где решение обеспечивает точную корректировку параметров привода в реальном времени, что значительно улучшает как переходные, так и стационарные режимы работы. Кроме того, система обладает масштабируемостью, благодаря модульной архитектуре, которая поддерживает простую интеграцию дополнительных функций, таких как расширенный мониторинг или предиктивная аналитика.

Таким образом, разработанная внешняя система управления обеспечивает безопасное взаимодействие с сервоприводом СПШ и реализует две ключевые функции:

1. Корректировку параметров ПИД-регулятора в реальном времени через программный интерфейс.

2. Комплексный сбор данных (скорость, время) с использованием встроенных библиотечных инструментов для анализа динамики системы, которые имеют динамические характеристики, представленные на рис. 4.

[1] Ссылка на документацию https://python-can.readthedocs.io/en/stable/.

Перерегулирование (англ. Overshoot). Это величина, на которую фактическая скорость серводвигателя превышает целевую (желаемую) скорость в переходном режиме до стабилизации. Обычно выражается в процентах от целевой скорости. Минимизация перерегулирования важна для предотвращения чрезмерной скорости, которая может вызвать механические нагрузки или нестабильность системы [15, 16].

$$M_p = c(t_p) - c(\infty), \tag{3}$$

где $c(t_p)$ – это пиковое значение отклика, а $c(\infty)$ это установившееся (финальное) значение отклика.

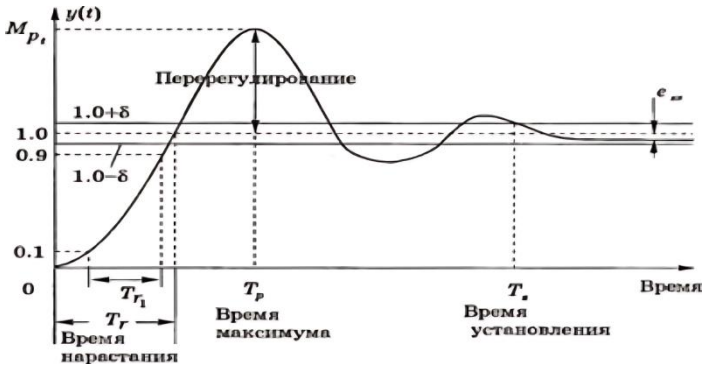


Рис. 4. Динамические характеристики отклика второго порядка управляющей системы

Время нарастания (англ. Rise Time, RT). Это время, необходимое для того, чтобы скорость серводвигателя увеличилась с 10% до 90% от её конечного установившегося значения после подачи управляющего сигнала. Оно показывает, насколько быстро двигатель разгоняется до заданной скорости. Меньшее время нарастания предпочтительно для систем, требующих быстрого отклика [17].

Время установления (англ. Settling Time, ST). Это продолжительность, за которую скорость двигателя достигает и остаётся в пределах заданной погрешности (±2% или ±5%) от целевой скорости после переходного процесса. Этот параметр отражает, насколько быстро система стабилизируется без значительных колебаний или отклонений [18, 15]:

$$t_s = \frac{3}{\delta w_n} = 3\tau. \tag{4}$$

Для 2% запуска:

$$t_s = \frac{4}{\delta w_n} = 4\tau, \tag{5}$$

где τ – постоянная времени, равная $\frac{1}{\delta w_n}$.

Следовательно, разработанная внешняя система управления предоставляет расширенные возможности сбора данных и их обработки с использованием алгоритмов машинного обучения, преобразуя систему в открытую и гибкую платформу управления. Эта гибкость позволяет применять генетические алгоритмы для автоматической настройки параметров в реальном времени. Однако, как было отмечено ранее, такой онлайн-режим работы может оказывать негативное влияние на работу сервопривода. Для обеспечения безопасной эксплуатации и предотвращения потенциальных рисков предложенная система осуществляет сбор и запись данных отклика двигателя в течение определенных временных интервалов для формирования обучающих выборок. Эти выборки впоследствии используются для обучения классификатора на основе нейронных сетей с целью корректировки случайных значений параметров в пределах безопасных границ, предотвращающих возможное повреждение сервопривода. В следующем пункте описывается гибридный алгоритм, основанный на генетическом алгоритме и нейросетевом классификаторе.

4. Разработка алгоритма автонастройки ПИД параметров. На рис. 5 представлена обобщенная схема генетического алгоритма для автонастройки ПИД параметров на основе нейронной сети.

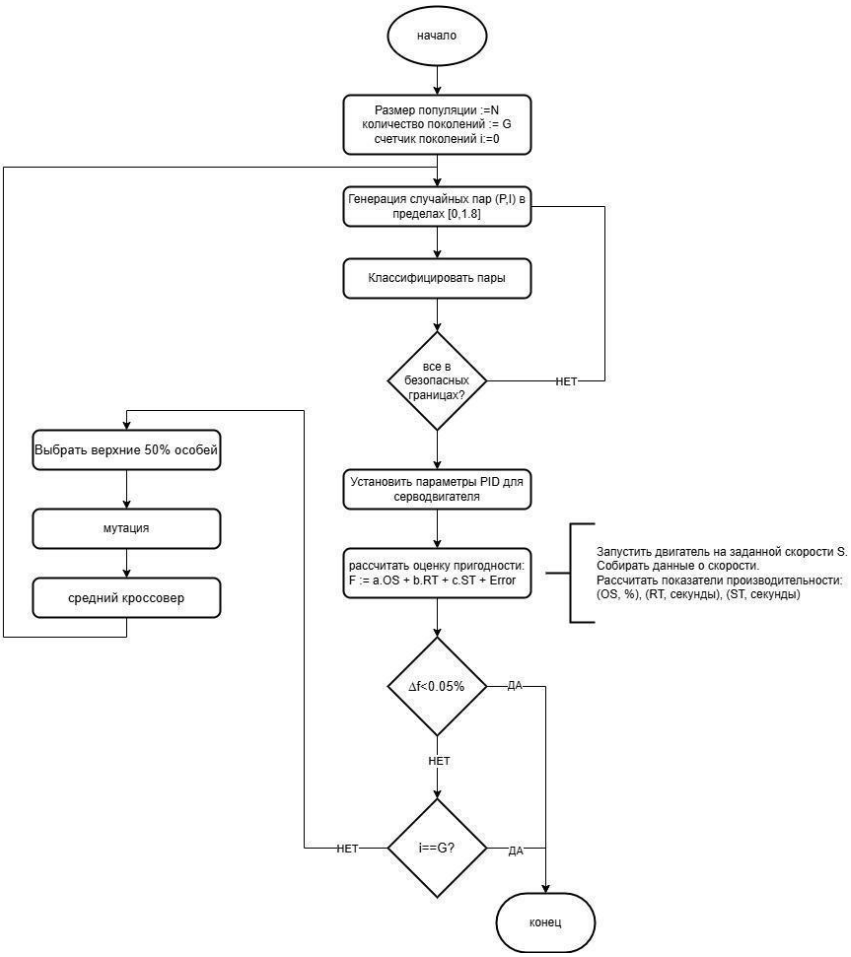


Рис. 5. Обобщенная схема алгоритма автонастройки ПИД-параметров

Алгоритм следует комбинированному подходу, объединяющему генетический алгоритм и нейронную сеть для оптимизации ПИД-параметров серводвигателя [19, 20]. Алгоритм начинает с инициализации популяции. Для этого генерируются случайные пары (П, И) в диапазоне [0, 1,8]. Затем пары фильтруются с помощью классификатора нейронной сети для отсеивания неэффективных комбинаций, которые попадают в небезопасные границы.

Далее выполняется отбор 50% лучших хромосом на основе функции пригодности. Остальные хромосомы формируются посредством операторов мутации и скрещивания (кроссовера).

С использованием сгенерированных пар ПИД-параметров алгоритм настраивает ПИД-регулятор, затем запускает двигатель на скорости S. После этого алгоритм считывает показания скорости и вычисляет показатели производительности, чтобы объединить их в функцию пригодности. Показатели производительности включают: перерегулирование (OS); время нарастания (RT); время установления (ST); ошибку (Error). Функция пригодности алгоритма определяется как:

$$f = a \cdot OS + b \cdot RT + c \cdot ST + d \cdot E. \quad (6)$$

Алгоритм завершает работу, если достигается максимальное число поколений (G=20 по умолчанию), а также, если изменение пригодности Δf <0,05% сохраняется в течение 5 последующих поколений, где:

$$\Delta f_{(t)} = \frac{f_{(t)} - f_{(t-1)}}{|f_{(t-1)}|} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Значение $\Delta f_{(t)}$ рассчитывается как процентное изменение пригодности между поколениями. Алгоритм эффективно сочетает в себе глобальный поиск и машинное обучение для настройки ПИД-регулятора. Алгоритм направлен на минимизацию нежелательных колебаний и улучшение переходных характеристик системы, что подтверждается экспериментальными результатами, представленными в следующем разделе.

5. Вычислительный эксперимент и анализ полученных результатов. Для оценки производительности разработанной внешней системы управления при отслеживании ключевых характеристик отклика, включая перерегулирование, время нарастания и время установления, применяется комбинированный алгоритм оптимизации, сочетающий классификатор машинного обучения и генетический алгоритм. В данном разделе описываются детали реализации, такие как критерии выбора классификатора, процесс настройки генетического алгоритма, а также обсуждается влияние применения этих решений на снижение уровня шума серводвигателя.

Для генетического алгоритма было установлено количество поколений, равное 20, и размер популяции в каждом поколении – 10 хромосом. На каждом этапе отбирается 50% родителей-хромосом, после чего оставшаяся часть популяции формируется посредством оператора скрещивания с применением мутаций. Если в результате скрещивания получаются небезопасные значения (согласно критериям классификатора), система генерирует новые случайные значения (аналогично начальной стадии) и повторно проверяет их через классификатор для корректировки.

Для обучения классификаторов использовался специально сформированный набор данных, генерируемый разработанной внешней системой управления. Этот датасет включает следующие ключевые параметры:

1. Параметры ПИД-регулятора - конкретные значения коэффициентов (П, И, Д).

2. Характеристики отклика серводвигателя: величина перерегулирования, время нарастания, время установления и ошибка в установившемся режиме.

3. Бинарные метки классификации.

Основная задача классификатора заключается в анализе пар значений (П, И) и определении, попадают ли они в безопасную рабочую зону или выходят за допустимые пределы. При этом алгоритм оценивает не просто отдельные коэффициенты, а их комплексное взаимодействие и влияние на динамику системы.

Такой подход позволяет заранее отсекать потенциально опасные комбинации параметров, которые могут привести к нестабильной работе или повреждению оборудования. Важно отметить, что классификатор обучался на реальных экспериментальных данных, что обеспечивает высокую достоверность его прогнозов.

Для решения задачи классификации был выбран MLP нейросетевой классификатор. Архитектура нейронной сети описывается следующим образом:

1. Входной слой содержит два нейрона (соответствующих размерностям признаков *П* и *И*, так как значение *Д* фиксировано и по умолчанию равно 1 в текущем эксперименте);

2. Два полностью связанных скрытых слоя;

3. Выходной слой с одним нейроном для бинарной классификации.

Для обучения был выбран оптимизатор *Adam,* благодаря его адаптивным возможностям обучения и стабильной работы с разнообразными наборами данных. В скрытых слоях применялись функции активации *ReLU*, что обеспечило высокую эффективность и предотвратило проблему затухающих градиентов.

Процедура определения оптимального количества нейронов включала тестирование первого скрытого слоя с размерностью от 5 до 100 нейронов (с шагом 5), затем осуществлялся подбор второго скрытого слоя в диапазоне 5-30 нейронов.

В результате были выявлены три высокопроизводительные конфигурации: {(45, 10), (25, 5), (50, 5)}. Все три варианта продемонстрировали сопоставимую точность тестирования. Структура (25, 5) была выбрана как оптимальный баланс между сложностью модели и вычислительной эффективностью. Финальное тестирование подтвердило, что данная конфигурация обеспечивает надежную фильтрацию PID-параметров в реальном времени в процессе оптимизации генетическим алгоритмом, что доказано полученными результатами.

Результаты. В ходе вычислительных экспериментов сравнивалась производительность предложенного комбинированного алгоритма (генетический алгоритм с интеграцией классификатора на основе нейронной сети) и стандартного генетического алгоритма без нейросетевого классификатора. Основное внимание уделялось анализу их поведения при наличии шумов инициализации на начальных этапах генераций.

На рис. 6 представлена осциллограмма скорости двигателя постоянного тока с неудачно подобранными параметрами ПИД-регулятора (П = 0,128, И = 1,769, Д = 0,6). График демонстрирует выраженные колебания скорости (обороты в минуту) вокруг заданного значения (600 об/мин, желтая линия). Зеленая кривая скорости показывает устойчивые предельные циклы колебаний в диапазоне от 367 до 1017 об/мин без признаков затухания.

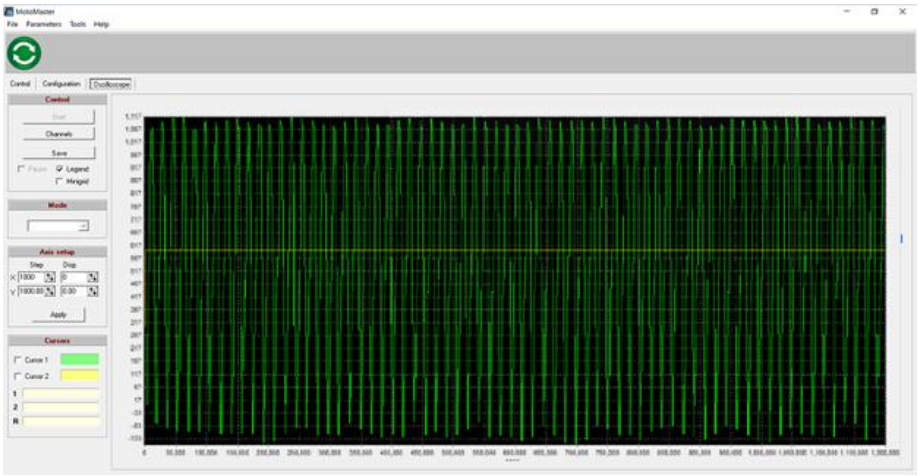


Рис. 6. Колебательная реакция скорости серводвигателя постоянного тока с неподходящими параметрами ПИД (П = 0,128, И = 1,769, Д = 0,6)

Такая картина характерна для разбалансированного ПИД-регулирования, где интегральная составляющая значительно преобладает над пропорциональной и производной. Конкретные проблемы выбранных параметров заключаются в следующем:

- слишком низкий пропорциональный коэффициент (П = 0,128), что приводит к слабой реакции на текущую ошибку, из-за чего регулятор не может эффективно компенсировать отклонения;
- чрезмерно высокий интегральный коэффициент (И = 1,769), что вызывает перекомпенсацию накопленной ошибки и провоцирует колебания;
- недостаточное влияние производной (Д = 0,6), что не позволяет должным образом стабилизировать систему из-за дисбаланса с интегральной составляющей;
- критическое соотношение Ки/Кп ≈ 13,8, что значительно превышает рекомендуемые значения для устойчивости системы.

После внедрения гибридного алгоритма с нейросетевым классификатором удалось устранить эти проблемы. На рис. 7 и 8 показаны осциллограммы скорости при оптимизированных параметрах ПИД:

- рис. 7 (П=0,698, И=0,188, Д= 0,6) – минимальное перерегулирование при переходном процессе;
- рис. 8 (П=0,487, И=0,05, Д=0,6) – полное отсутствие перерегулирования.

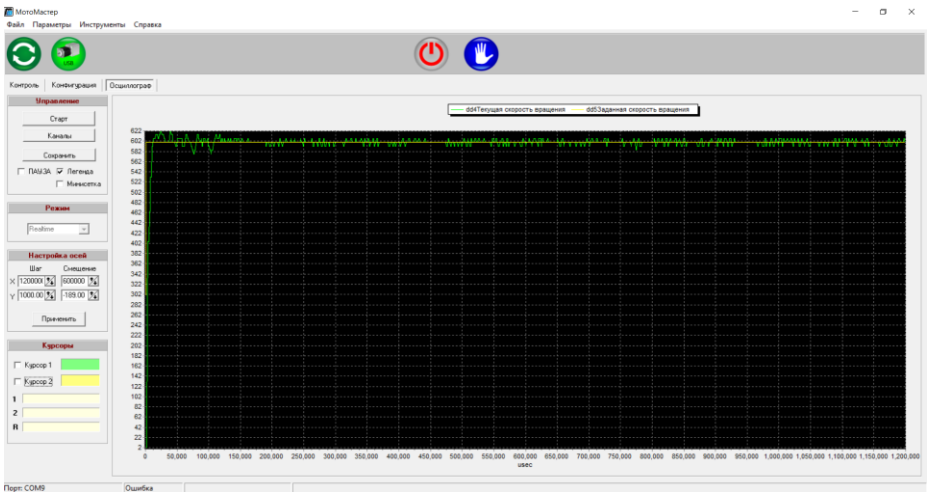


Рис. 7. Колебательная реакция скорости серводвигателя постоянного тока с подобранными параметрами ПИД (П = 0,698, И = 0,188, Д = 0,6)

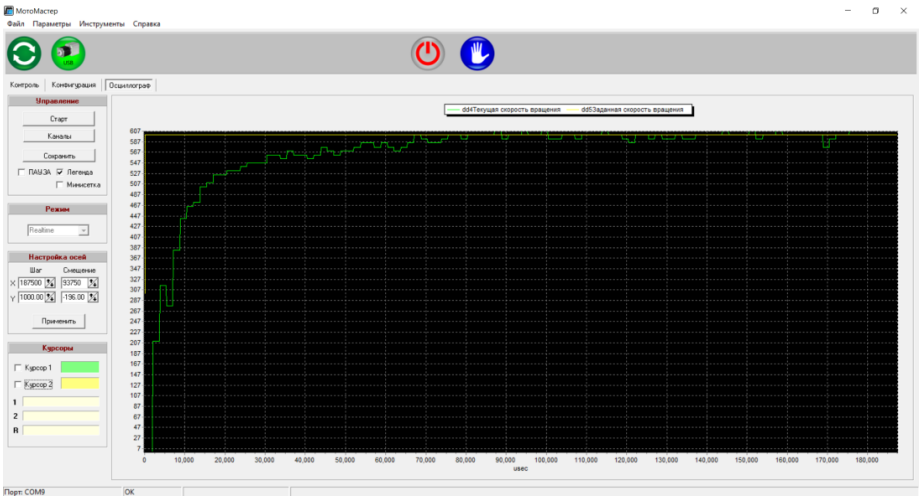


Рис. 8. Колебательная реакция скорости серводвигателя постоянного тока с подобранными параметрами ПИД (П = 0,487, И = 0,05, Д = 0,6)

Экспериментальные результаты демонстрируют эффективность нейросетевого классификатора в предотвращении нестабильности, вызванной случайной инициализацией ПИД-параметров (основной причины переходных шумов).

Выделим ключевые преимущества предложенного алгоритма:

1) полное исключение опасных режимов работы – за 450 тестовых запусков не зафиксировано ни одного отказа двигателя, благодаря предварительному исключению неоптимальных параметров;

2) ускорение сходимости на ~50% за счет сужения области поиска для генетического алгоритма (диапазон 0-0.9 вместо исходного 0-1.8), что вдвое сокращает пространство возможных решений.

Особое значение в стабилизации начальной фазы оптимизации имеет роль нейронной сети. Классификатор последовательно проверяет все генерируемые значения, отсекая аномальные варианты и оставляя только параметры из безопасного диапазона. Этот механизм сохраняет свою эффективность на всех этапах оптимизации, вплоть до достижения оптимального отклика системы.

Предложенный алгоритм успешно решает задачу минимизации шумов инициализации при сохранении стабильности процесса оптимизации. Перспективным направлением дальнейших исследований является сравнительный анализ с альтернативными методами настройки ПИД-регуляторов, поскольку проведенное исследование было сосредоточено на решении проблем, связанных со стохастической природой генетических алгоритмов.

Заключение. В данной статье исследована возможность применения генетического алгоритма и нейросетевого классификатора для оптимизации параметров ПИД-регуляторов в сервосистемах. В работе предложена новая реализация генетического алгоритма с нейросетевым классификатором, что позволяет эффективно определять оптимальные ограничения параметров управления. Проведенные сравнительные экспериментальные исследования убедительно продемонстрировали преимущества нейронной сети в точном моделировании сложных нелинейных зависимостей между регулируемыми параметрами.

Важным аспектом исследования стало обучение нейросетевого классификатора на реальных эксплуатационных данных системы, что обеспечило динамическое ограничение процесса оптимизации только физически реализуемыми и безопасными значениями параметров. Разработанная система управления показала два принципиальных преимущества: во-первых, она позволяет устанавливать строгие границы параметров ПИД в диапазоне 0-0.9 (вместо традиционных 0-1.8), что полностью исключает возможность отказов оборудования и было подтверждено 450 успешными циклами тестирования; во-вторых, предложенный алгоритм обеспечивает сокращение пространства поиска оптимальных решений на 40%, значительно ускоряя процесс сходимости алгоритма.

Перспективы дальнейшего развития данного исследования связаны с адаптацией полученных решений для различных типов сервоприводов, особенно для сложных замкнутых систем, плохо поддающихся традиционному моделированию. Особый интерес представляет интеграция методов обучения с подкреплением, которая позволит использовать накопленные данные оптимизации для дальнейшего повышения эффективности управления. Предложенный адаптивный подход открывает новые возможности для создания интеллектуальных самонастраивающихся систем промышленного управления, сочетающих высокую производительность с гарантированной безопасностью эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Saini S., Hernandez J., Nayak S.* Auto-Tuning PID Controller on Electromechanical Actuators Using Machine Learning // SAE Technical Paper. – 2023.
2. *Shi G., Dai C., Liu S., Li D., Ding Y.* The Design of a Reference Model-Based Proportional-Integral-Derivative Controller with the Generalized Derivative // 2023 23rd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). – IEEE, 2023. – P. 547-552.
3. *Majeed D.A., Yaseen M., Ghaffori A.J., Ahmed S.R., Hakim B.A., Hussain A.-S.T.* Advanced Optimization Techniques for CNC Machining: A Comparative Study of Genetic Algorithms, Simulated Annealing, and Particle Swarm Optimization // 2024 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA). – IEEE, 2024. – P. 1-6.
4. *Ахмад З.* Сравнение колец ПИД-регулирования и нечетких регуляторов для регулирования скорости серводвигателя // Матер. XV всероссийской конференции с международным участием "Машиностроение: традиции и инновации (МТИ –2022)". – М.: Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", 2022. – С. 141-148.
5. *Wang J.S., Wang J.C., Wang W.* Self-tuning of PID parameters based on particle swarm optimization // Control and Decision. – 2005. – Vol. 20. – P. 73-76.
6. *Mishra D.P., Raut U., Gaur A.P., Swain S., Chauhan S.* Particle swarm optimization and genetic algorithms for PID controller tuning // 2023 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT). – IEEE, 2023. – P. 189-194.
7. *Isa S.S.M., Azri M., Ibrahim Z., Talib M., Sulaiman M., Meng Q., Khanipah N.H.A., Rahim N.* Experimental investigation on scaling factor of fuzzy logic speed control for induction motor drives // 2017 6th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI). – 2017.
8. Servoprivod SPŠ [Servo drive SPSh]. – URL: https://www.servotechnica.ru/catalog/type/brand/index.pl?id=18 (дата обращения: 19.04.2025).
9. Servotekhnika [Servo technology]. – URL: http://servotechnica.ru/ (дата обращения: 18.04.2025).
10. *Balachandra D., Mani K., Ramesh B.* Anti-windup Robust Controller Considering Saturation of Current and Speed for Speed Servo System // International journal of engineering research and technology. – 2014.

11. *Kaneko K., Ohishi K.* Anti-windup robust controller considering motor dynamics for speed servo system // 2013 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM). – 2013.
12. *Hinokimoto K. [et al.]*. A Data-driven Design Method of PID Controller with Noise Filter // IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. – 2017.
13. *Живкович Т., Драганович М.* Защита от шума в окружающей среде города Белграда // Alternative Energy and Ecology. – 2015.
14. *Ахмад З., Мартинов Г.М.* Разработка системы управления сервоприводом на базе шины CAN и микрокомпьютера Raspberry Pi // Автоматизация в промышленности. – 2025. – № 5.
15. *Kanojiya R.G., Meshram P.M.* Optimal tuning of PI controller for speed control of DC motor drive using particle swarm optimization // 2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET). – 2012.
16. *Kamal M., Mathew L., Chatterji S.* Speed control of brushless DC motor using intelligent controllers // 2014 Students Conference on Engineering and Systems. – 2014.
17. *Meena D., Chauhan S.* Speed control of DC servo motor using genetic algorithm // 2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC). – 2017.
18. *Mishra P., [et al.]*. Optimization of PID Controller with First Order Noise Filter // 2015 International Conference on Futuristic Trends on Computational Analysis and Knowledge Management (ABLAZE). – 2015.
19. *Кравченко Ю.А.* Построение прогнозных моделей динамических систем на основе интеграции нейронных сетей и генетических алгоритмов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2006. – Т. 64, № 9-1. – С. 103-104.
20. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. – 2010.

REFERENCES

1. *Saini S., Hernandez J., Nayak S.* Auto-Tuning PID Controller on Electromechanical Actuators Using Machine Learning, *SAE Technical Paper,* 2023.
2. *Shi G., Dai C., Liu S., Li D., Ding Y.* The Design of a Reference Model-Based Proportional-Integral-Derivative Controller with the Generalized Derivative, *2023 23rd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. IEEE, 2023, pp. 547-552.
3. *Majeed D.A., Yaseen M., Ghaffori A.J., Ahmed S.R., Hakim B.A., Hussain A.-S.T.* Advanced Optimization Techniques for CNC Machining: A Comparative Study of Genetic Algorithms, Simulated Annealing, and Particle Swarm Optimization, *2024 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. IEEE, 2024, pp. 1-6.
4. *Akhmad Z.* Sravnenie kolets PID-regulirovaniya i nechetkikh regulyatorov dlya regulirovaniya skorosti servodvigatelya [Comparison of PID control loops and fuzzy controllers for servo motor speed control], *Mater. XV vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Mashinostroenie: traditsii i innovatsii (MTI –2022)"* [Proceedings of the XV All-Russian Conference with International Participation "Mechanical Engineering: Traditions and Innovations (MIT-2022)"]. Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet "STANKIN", 2022, pp. 141-148.
5. *Wang J.S., Wang J.C., Wang W.* Self-tuning of PID parameters based on particle swarm optimization, *Control and De*cision, 2005, Vol. 20, pp. 73-76.
6. *Mishra D.P., Raut U., Gaur A.P., Swain S., Chauhan S.* Particle swarm optimization and genetic algorithms for PID controller tuning, *2023 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*. IEEE, 2023, pp. 189-194.
7. *Isa S.S.M., Azri M., Ibrahim Z., Talib M., Sulaiman M., Meng Q., Khanipah N.H.A., Rahim N.* Experimental investigation on scaling factor of fuzzy logic speed control for induction motor drives, *2017 6th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI),* 2017.
8. Servoprivod SPŠ [Servo drive SPSh]. Available at: https://www.servotechnica.ru/catalog/type/brand/index.pl?id=18 (accessed 19 April 2025).
9. Servotekhnika [Servo technology]. – URL: http://servotechnica.ru/ (дата обращения: 18.04.2025).
10. *Balachandra D., Mani K., Ramesh B.* Anti-windup Robust Controller Considering Saturation of Current and Speed for Speed Servo System, *International journal of engineering research and technology,* 2014.
11. *Kaneko K., Ohishi K.* Anti-windup robust controller considering motor dynamics for speed servo system, *2013 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM),* 2013.
12. *Hinokimoto K. [et al.]*. A Data-driven Design Method of PID Controller with Noise Filter, *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering,* 2017.
13. *Zhivkovich T., Draganovich M.* Zashchita ot shuma v okruzhayushchey srede goroda Belgrada [Noise protection in the environment of the city of Belgrade], *Alternative Energy and Ecology,* 2015.
14. *Akhmad Z., Martinov G.M.* Razrabotka sistemy upravleniya servoprivodom na baze shiny CAN i mikrokomp'yutera Raspberry Pi [Development of a servo drive control system based on the CAN bus and the Raspberry Pi microcomputer], *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in Industry], 2025, No. 5.

15. *Kanojiya R.G., Meshram P.M.* Optimal tuning of PI controller for speed control of DC motor drive using particle swarm optimization, *2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET)*, 2012.
16. *Kamal M., Mathew L., Chatterji S.* Speed control of brushless DC motor using intelligent controllers, *2014 Students Conference on Engineering and Systems*, 2014.
17. *Meena D., Chauhan S.* Speed control of DC servo motor using genetic algorithm, *2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)*, 2017.
18. *Mishra P., [et al.]*. Optimization of PID Controller with First Order Noise Filter, *2015 International Conference on Futuristic Trends on Computational Analysis and Knowledge Management (ABLAZE)*, 2015.
19. *Kravchenko Yu.A.* Postroenie prognoznykh modeley dinamicheskikh sistem na osnove integratsii neyronnykh setey i geneticheskikh algoritmov [Construction of predictive models of dynamic systems based on the integration of neural networks and genetic algorithms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2006, Vol. 64, No. 9-1, pp. 103-104.
20. *Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M.* Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms], 2010.

Ахмад Зулфикар – Московский государственный технологический университет “Станкин”; e-mail: zoualfikarahmad@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: +79636898784; кафедра компьютерных систем управления; аспирант.

Кравченко Юрий Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79289080151; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; профессор.

Мансур Али Махмуд – Южный федеральный университет; e-mail: mansur@sfedu.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +79880158697; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; программист.

Ahmad Zoualfikar – Moscow State Technological University "Stankin"; e-mail: zoualfikarahmad@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +79636898784; the Department of Computer Control Systems; postgraduate student.

Kravchenko Yury Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: yakravchenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79289080151; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; professor.

Mansour Ali Mahmoud – Southern Federal University; e-mail: mansur@sfedu.com; Taganrog, Russia; phone: +79880158697; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; programmer.

УДК 004.89 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-250-262

М.А. Лапина, Д.А. Лукьянов, В.Г. Лапин, Н.Н. Кучеров

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ САЙТОВ-МОШЕННИКОВ

В настоящее время большое количество процессов связано с большими объёмами данных, которые необходимо анализировать. С увеличением объёма информации её анализ становится более объёмной и сложной задачей. Возникает проблема поиска инструмента, который поможет компаниям и учреждениям в сборе, анализе и прогнозировании данных. Машинное обучение является областью искусственного интеллекта, которая находит закономерности в базе данных и на их основе пытается спрогнозировать результат. Ещё одной областью применения машинного обучения является детектирование сайтов-мошенников. В настоящее время с развитием информационных технологий цифровые преступления стали серьёзной угрозой для конфиденциальной информации и данных пользователей. Искусственный интеллект способен анализировать параметры сайтов и определять наличие угроз для информации. Исследование направлено на систематизацию знаний о фишинговых атаках и исследовании методов машинного обучения для обнаружения сайтов-мошенников. В ходе выполнения исследования были разработаны методы машинного обучения по обнаружения фишинговых сайтов, построены схемы, которые позволяют моделям машинного обучения правильно преобразовывать данные для подачи их в модели. Анализ данных, предоставленных в датасете, позволил преобразовать данные для корректной работы моделей, что позволило избежать ошибок. Была решена проблема переобучения моделей машинного обучения. Детальное изучения датасета позволило отфильтровать данные, которые могли

вызывать ошибки в работе модели и понизить качество прогнозирования. В результате работы разработаны методы поиска фишинговых атак с использованием моделей машинного обучения, которые были протестированы на имеющихся данных, на основе полученных результатов построены графики изменения точности обнаружения нелегитимных сайтов от изменения настроек моделей. Был проведён анализ исследования и подведены результаты проведённой работы.

Машинное обучения; фишинг; сайт-мошенник; KNIME; киберпреступность; кибер-атаки; поиск уязвимостей; искусственный интеллект.

M.A. Lapina, D.A. Lukyanov, V.G. Lapin, N.N. Kucherov

RESEARCH OF MACHINE LEARNING METHODS FOR DETECTING FRAUDULENT WEBSITES

Every year our lives become more and more connected with large volumes of data that need to be analyzed. As the volume of information increases, its analysis becomes a more voluminous and complex task. In this situation, the problem of finding a tool that will help companies and institutions in collecting, analyzing and forecasting data arises. Machine learning is an area of artificial intelligence that finds patterns in a database and, based on them, tries to predict the result. Another area of application of machine learning is the detection of fraudulent sites. Currently, with the development of information technology, digital crimes have become a serious threat to confidential information and user data. Artificial intelligence is able to analyze site parameters and determine the presence of threats to information. The study is aimed at systematizing knowledge about phishing attacks and studying machine learning methods for detecting fraudulent sites. During the study, machine learning methods for detecting phishing sites were developed, schemes were built that allow machine learning models to correctly transform data for feeding them to models. The analysis of the data provided in the dataset made it possible to correctly transform the data for the correct operation of the models, which will avoid errors. The problem of retraining machine learning models was solved. A detailed study of the dataset made it possible to filter out data that could cause errors in the model and reduce the quality of artificial learning forecasting. As a result of the work, the developed methods for searching for phishing attacks using machine learning models were tested on test data, based on the results obtained, graphs of changes in the accuracy of detecting illegitimate sites from changing the model settings were constructed. An analysis of the study was carried out and the results of the work were summarized.

Machine learning; phishing; fraudulent website; KNIME; cybercrime; cyber attacks; vulnerability scanning; artificial intelligence.

Введение. Фишинг – тип интернет-мошенничества, целью которого является получение персональных данных пользователя: пароли, данные кредитных карт, банковские счета, почты, паспортные данные и другая конфиденциальная информация [1]. Фишинговыми атаками могут являться: поддельные письма на электронную почту от банков, провайдеров с просьбой обновить персональные данные. Хакеры создают копии оригинальных сайтов, которые внешне трудно отличить от легитимных. Вводя персональные данные, пользователь передаёт их в руки злоумышленникам, которые смогут активно пользоваться почтой, банковской картой или паспортными данными объекта атаки. Впервые методы, которые используют современные хакеры, были описаны в 1987 году [2]. Термин “Фишинг” впервые прозвучал 2 января 1996 года. Упоминание о данном явлении впервые появилось в группе новостей “Usenet” под названием “AOHello” [2]. В январе 1996 года была проведена первая в истории фишинговая атака. Суть атаки заключалась в использовании злоумышленниками алгоритмов для генерации случайных номеров кредитных карт и регистрации их в системе AOL (America online), позже они использовались для рассылки спама. Хакеры маскировались под сотрудников AOL и просили пользователей обновить их данные: пароли, банковские счета. Позже данные попадали к злоумышленникам [3]. Общий план фишинговой атаки проиллюстрирована на рис. 1.

С развитием технологий хакеры придумывают новые способы, с помощью которых проводятся фишинговые атаки. В 2003 году была зарегистрирована первая фишинговая атака на банк о чем банк The Banker сообщил в статье Криса Сангани под названием“ Борьба с кражей личных данных” [4, 5].

В 2007 году 3,6 миллиона человек потеряли в общей сумме 3,2 миллиарда долларов США в результате фишинговых атак. Хакеры использовали навыки социальной инженерии, отправляя на почту пользователей открытки с поздравлениями, купоны на скидку и письма от технической поддержки сайта [6].

Рис. 1. План фишинговой атаки

В настоящее время из-за развития компьютерных технологий и широкого распространения интернета защита от фишинговых атак стала надёжнее, но хакеры придумывают новые методы атак. Выделяют следующие типы фишинговых атак.

Целевой фишинг – вид фишинга, для которого злоумышленники используют письма, приходящие на почту пользователей. Этот вид атак имеет специализированный подход, благодаря социальным сетям, злоумышленники собирают информацию о пользователе. Собранную информацию хакеры используют в письме, убеждая получателя в том, что письмо отправлено кем-то другим в организации. В итоге, злоумышленники заполучают доступ к данным пользователя [7].

Vishing – данный вид фишинговой атаки основан на использовании телефонного звонка. Пользователю поступают звонки от злоумышленников, которые получают информацию манипуляциями. Данная атака построена на создании у пользователя ощущения критичности и срочности, чтобы у него не осталось другого выхода, кроме как передать конфиденциальные данные в руки преступников [8].

Клон-фишинг – в данном виде фишинга также используется электронная почта. Злоумышленники создают точную копию письма, которое уже получал пользователь, меня в них ссылки и вложения. Пользователь, не подозревая обмана, открывает данное письмо, передавая данные преступникам [9].

Фишинг в поисковых системах – данный вид фишинга основан на обходе фильтров поисковых систем. Хакеры используют SEO (поисковую оптимизацию), чтобы их сайт стоял в поиске выше других и больше пользователей перешли на фишинговый сайт. Данные сайты являются клонами-двойниками оригинальных сайтов. Пользователи вводят свои данные, которые переходят в руки мошенников [10].

В табл. 1 приведены существующих в настоящее время способы защиты данных от фишинговых атак.

Таблица 1

Сравнительный анализ методов защиты от фишинговых атак

Методы	Характеристики				
	Удобность	Конфиденциальность	Доступность	Приватность	Целостность
Фильтрация URL [11]	✔		✔		✔
Двухфакторная аутентификация [12]		✔	✔	✔	✔
Обучение пользователей [13]		✔	✔	✔	
Браузерные расширения [14]	✔		✔		

На основе приведённой таблицы можно сделать вывод, что в настоящее время универсального способа гарантированно защититься от фишинговых атак нет, каждый из методов используется преимущественно для блокирования или детектирования отдель-

ных видов фишинговых атак, но активное развитие машинного обучения позволяет облегчить поиск потенциально опасных сайтов, ссылок и писем, которые могут быть разработаны хакерами.

Ожидаемыми результатами исследования являются:

1) Систематизация слабостей и уязвимостей систем перед фишинговыми атаками.

2) Изучение и создание методов машинного обучения для детектирования фишинговых сайтов.

Машинное обучение (МО) – это область искусственного интеллекта, которая позволяет ему находить закономерности в данных и делать прогнозы. Программа анализирует данные, находит в них последовательности и закономерности, обучается и применяет результаты на практике, прогнозируя данные. Для работы с машинным обучением необходим набор данных (датасет) [15], в котором внесены основные характеристики сайтов и результат. Данный датасет создан для обнаружения фишинговых сайтов, которые маскируются под легитимными ресурсами, чтобы украсть данные пользователей. Используя машинное обучение, можно обучать модели машинного обучения анализировать параметры сайтов и находить в них закономерности, которые помогут определить легитимность сайта. Для более детальной и точной работы с датасетом необходимо произвести анализ: определить типы данных, разбить данные на более важные и менее важные для машинного обучения.

Для обнаружения сайтов-мошенников необходимо предоставить модели машинного обучения параметры, которые будут анализироваться и проверяться. Параметры, необходимые для проверки сайта на легитимность представлены на рис. 2.

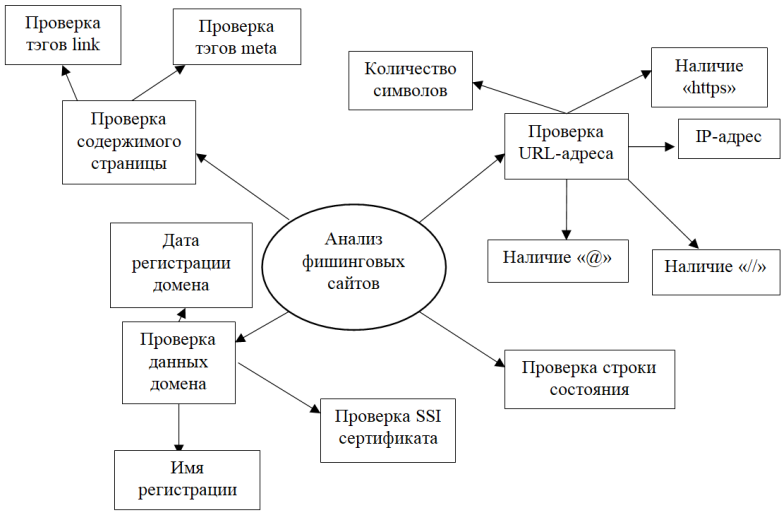


Рис. 2. Параметры, анализируемые при поиске фишинговых сайтов

Размер и структура: данный датасет [15] содержит в себе 11055 строк и 32 столбца. Один столбец index содержит категориальные данные, остальные 31-числовые.

Целевая переменная: целевым столбцом является столбец Result, в нём содержится две переменные (0 и 1).

Характеристика признаков: столбцы представляют собой бинарные и категориальные признаки (-1,0,1). Некоторые признаки связаны с URL-адресами (URLURL_Length). Другие относятся к характеристикам страницы (Page_Rank). Так же наблюдаются признаки, касающиеся безопасности (statistical_report).

Важность признаков: данные можно разбить на три группы важности для машинного обучения: ключевые для модели, средней важности и менее значимые.

К ключевым для модели данным относятся: having_IPhaving_IP_address, SSLfinal_State, web_traffic, Google_Index, Page_Rank, age_of_domain, DNSRecord.

К средней важности относятся: having_sub_domain, Prefix_Suffix, Shortining_Servicce, Reauest_URL.

К менее важным можно отнести следующие столбцы: popUpWindow, on_mouseover, RightClick, Iframe.

На основе полученных данных из анализа датасета и основываясь на информацию рис. 3, необходимо произвести выборку основных параметров, которые модель машинного обучения будет анализировать и на их основе прогнозировать результат проверки легитимности сайтов.

Для работы с выбранным датасетом необходимо выбрать аналитическую платформу, которая предоставляет возможность работать с машинным обучением. В данном исследование для работы была выбрана аналитическая платформа с открытым кодом – KNIME [16].

KNIME [16] – это аналитическая платформа с удобным интерфейсом, предназначенная для работы с моделями машинного обучения, анализа и обработки данных и автоматизации процессов аналитики. Платформа позволяет пользоваться машинным обучением, не используя языки программирования, все необходимые команды уже запрограммированы в специальные узлы (Nodes), которые и выполняют основные функции в чтении, обработке, анализе, прогнозировании и визуализации данных. Данная платформа предоставляет широкий выбор моделей машинного обучения. Использованные в исследовании модели представлены на рис. 3.

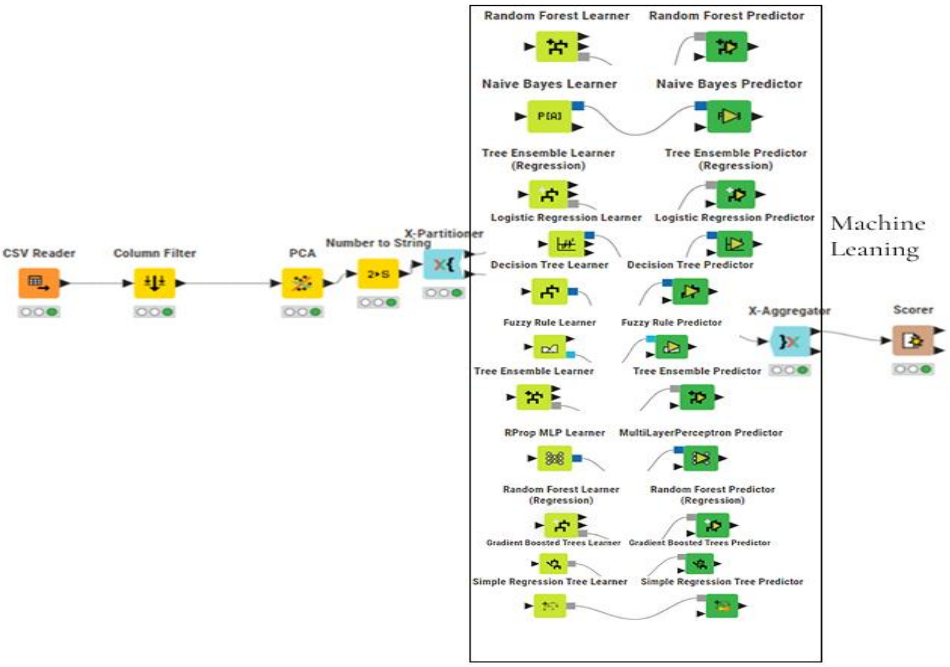


Рис. 3. Модели машинного обучения

Данные модели машинного обучения являются одними из самых популярных. Для использования предоставляются следующие модели: деревья решений, ансамбли деревьев решений, случайные леса деревьев решений, логическая регрессия, линейная регрессия, нейронные сети, метод к-ближайших соседей, обучение решением последовательных задач, наивный байес, модель, использующая нечёткую логику для обучения.

В данном исследовании поставлена задача классификации, присвоение сайтам категорий: 1– сайт фишинговый, 0 – сайт легитимный.

Для решения поставленной задачи была собрана схема, позволяющая загрузить данные датасета в модель машинного обучения Decision Tree Learner. Первым шагом было создание рабочего места (Workflow), воспользовавшись узлом необходимо считать данные датасета (Node) CSV Reader (IO → Read → CSV Reader), необходимо выбрать путь до файла. В данном виде в Decision Tree Learner подавать данные нельзя, необходимо преобразовать их перед дальнейшим обучением модели. Для этого воспользуемся узлами: Column filter (Manipulation → column → column filter), PCA (Analytics → PCA), Number to String (Manipulation → convert & replace). После преобразования данных их необходимо разделить на две составляющие: обучающие данные, которые пойдут на обучение модели машинного обучения и тестовые, на которых обученная модель будет тестироваться, для этого необходимо использовать узел (Node) X-Partitioner (Analytics → cross validation → X-Partitioner). Данная нода в связи с нодой X-Aggregator позволяет пользоваться такой функцией как кросс-валидация. Нода Decision Tree Learner (Analytics → Decision Tree → Decision Tree Learner) является узлом, который является обучающей моделью машинного обучения. Данный узел имеет код, позволяющий машине использовать метод деревьев решений для обнаружения закономерности в параметрах легитимных и фишинговых сайтах. Decision Tree Predictro (Analytics → Decision Tree → Decision Tree Predictor) нода, позволяющая обученной модели использовать тестовые данные для прогнозирования легитимности сайтов. Нода Scorer (Analytics → Scoring → Scorer) является узлом, который позволяет оценивать точность спрогнозированных моделью данных, строить матрицу ошибок, позволяющая оценить, где были допущены ошибки при обучении модели [17]. Данная схема является обобщающей схемой модели машинного обучения, в дальнейшем исследовании будут использованы модели, показанные на рис. 3, которые показывали наилучший результат.

Модели машинного обучения. Каждая модель машинного обучения применяется в разных областях, для разных целей, классификация данные подразумевает использование всех существующих моделей машинного обучения. Для более широкого понимания в каком аспекте одна модель будет лучше другой создана сравнительная таблица (табл. 2) с характеристиками всех использованных моделей.

Таблица 2

Сравнительный анализ моделей машинного обучения

Модели МО	Характеристики			
	Производительность	Интерпретируемость	Устойчивость	Универсальность
Decision Tree [17]		✔		✔
RProp MLP [16] [17]			✔	✔
Naïve Bayes [16] [17]	✔	✔		
Random Forest [16]		✔	✔	✔
DL [17]			✔	✔
Logistic Regression [16] [17]	✔	✔		✔
Tree Ensemble [17]		✔	✔	✔
PNN [17]			✔	✔
Fuzzy Rule [17]	✔	✔		
Tree Ensemble(Regression) [17]		✔	✔	✔

В исследовании были использованы модели, использующие деревья решений для классификации. Для более детального и полного понимания принципа работы алгоритма необходимо математически обосновать использование данного метода в решении задачи классификации.

Деревья решений – модель машинного обучения, использующаяся для регрессии и классификации путём разбиения пространства признаков на области, соответствующие целевым значениям. Выделяют следующие этапы работы деревьев решений:

Структура деревьев.

Деревья состоят из **узлов**, в которых происходит проверка условий, **листьев**, которые содержат итоговые предсказания.

Разбиение пространства признаков.

На каждом узле дерево выбирает **признак** x_j и **порог** t, чтобы разделить данные на две подгруппы:

$$\text{Левые потомки: } \{x|x_j \le t\}, \text{Правые потомки } \{x|x_j > t\}$$

Оптимизация.

Выбор наилучшего разбиения основан на максимальной информативности. Для этого в деревьях решений используются:

Энтропия

$$H(D) = -\sum_{k=1}^{K} p_k \log_2 p_k, p_k = \frac{|D_k|}{|D|}$$

Индекс Джини

$$G(D) = 1 - \sum_{k=1}^{K} p_k^2$$

Прирост информации

$$IG = H(D) - \sum_{s\in\{left,right\}} \frac{|D_s|}{|D|} H(D_s)$$

4. Формальное предсказание:

Для нового элемента x дерево проходит путь от корня до листа, применяя условия узла. Предсказание высчитывается следующим образом,

$$f(x) = \sum_{m=1}^{M} c_m \cdot I(x \in R_m),$$

где R_m – область, соответствующая m-му листу, c_m – его значение, I – индикаторная функция

1) Модель машинного обучения **Random Forest** используется в своём алгоритме принцип деревьев решения, которые разделяют данные на основе признаков, искусственный интеллект создаёт лес деревьев решения и высчитывает среднее значение точности всех деревьев. Данная модель используется для классификации и регрессии.

На основе проведённых испытаний модели по обнаружению фишинговых атак построен график (рис. 4), демонстрирующий точность модели от её настроек.

Таблица 3

Точность модели

Tree depth	Accuracy, %
1	90.20
2	91.00
4	92.80
6	93.30
8	94.00
10	94.85
12	95.38
14	95.98
16	96.13
18	96.50
20	96.60

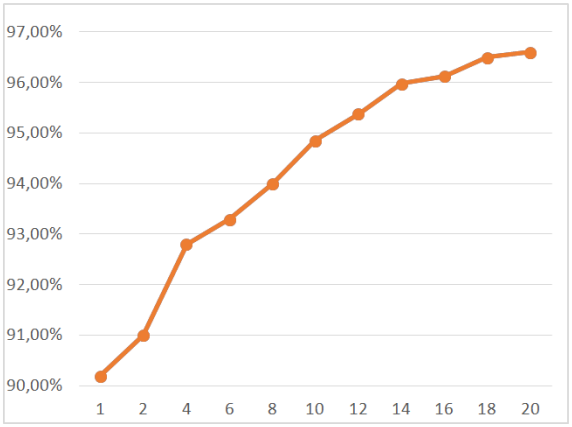


Рис. 4. График изменения точности модели

2) Модель машинного обучения **Tree Ensemble** использует ансамбль деревьев, каждое дерево прогнозирует данные, после прогнозирования прогнозы объединяются. Данная модель используется для классификации и регрессии. На основе проведённых испытаний модели построен график (рис. 5), который демонстрирует точность модели.

Таблица 4

Точность модели

Tree depth	Accuracy, %
1	89.04
2	90.77
4	92.83
6	92.96
8	93.85
10	94.56
12	95.44
14	95.92
16	96.21
18	96.32
20	96.59

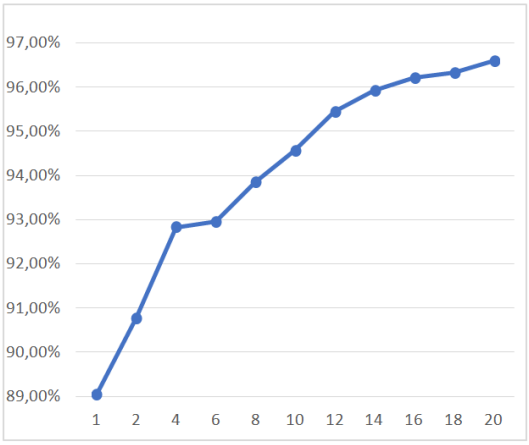


Рис. 5. График изменения точности модели

3) Модель машинного обучения **PNN** – алгоритм, который использует обучение на множестве последовательных задач, сохраняя данные из предыдущих задач.

На основе проведённых испытаний модели построен график (рис. 6), который демонстрирует точность модели.

Таблица 5

Точность модели

Theta minus(Plus)	Accuracy
0.1	87,50%
0.2	87,09%
0.3	86,40%
0.4	86,27%
0.5	86,59%
0.6	86,16%
0.7	82,91%
0.8	70,20%
0.9	55,71%
1	-

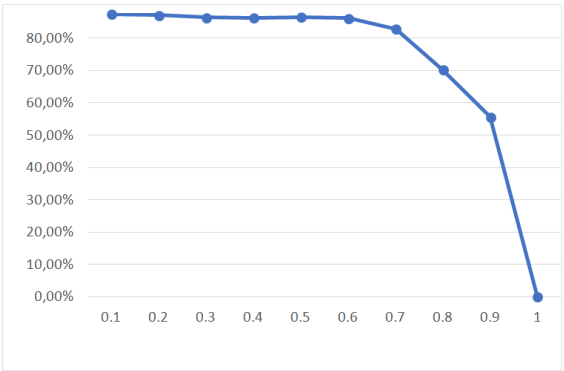


Рис. 6. График изменения точности модели

4) Модель машинного обучения **Gradient Boosted Trees** – данная модель использует алгоритм градиентного спуска для деревьев решений, что позволяет минимизировать потери точности.

На основе результатов проведённого исследования был построен график, представленный на рис. 7.

Таблица 6

Точность модели

Tree depth	Accuracy,%
1	92.43
2	94.06
4	95.70
6	96.96
8	97.08
10	97.34
12	97.07
14	97.00
16	96.70
18	96.26
20	96.42

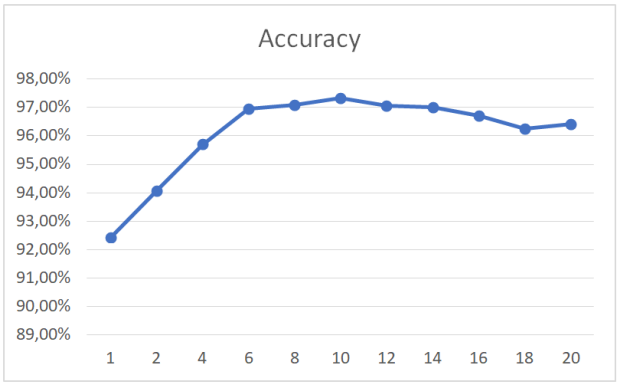


Рис. 7. График изменения точности модели

5) Модель машинного обучения **Tree Ensemble** – данная модель использует деревья решений для регрессии, что помогает классифицировать легитимные и фишинговые сайты. На основе результатов проведённого исследования был построен график, представленный на рис. 8.

Таблица 7

Точность модели

Tree depth	Accuracy,%
1	77,23%
2	84,46%
4	88,81%
6	91,41%
8	93,68%
10	95,24%
12	95,93%
14	96,17%
16	96,01%
18	96,19%
20	96,22%

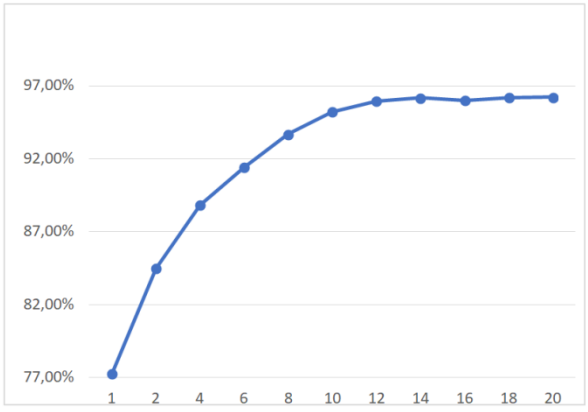


Рис. 8. График изменения точности модели

На основе проведённых испытаний был построен обобщающий график (рис. 9), включающий в себя результаты работы всех моделей машинного обучения.

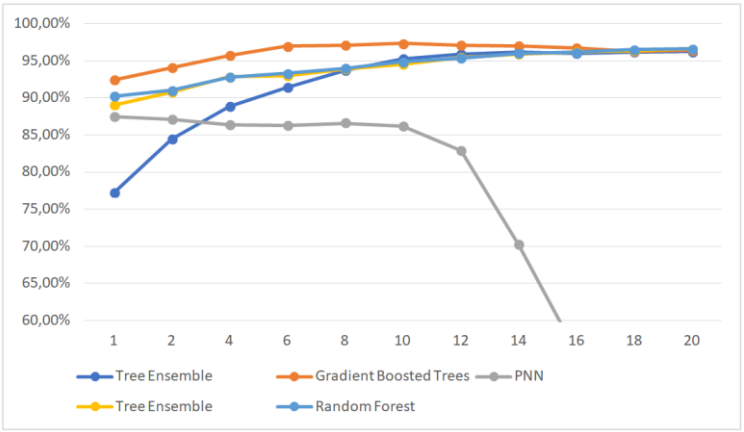


Рис. 9. Обобщающий график результатов

Борьба с переобучением. При проведении испытаний моделей машинного обучения была обнаружена проблема переобучения искусственного интеллекта, когда модель запоминает обученные данные и показывает 100% точность тестирования. Данная проблема критична и нуждается в решении по той причине, что, загрузив абсолютно новые данные, модель машинного обучение не сможет правильно обучиться и спрогнозировать результат. В данном исследовании решением проблемы переобучения модели является кросс-валидация. Кросс-валидация позволяет разделить вводимые данные на равные части, каждая часть данных будет обучающей и тестируемой, что позволит машине обучаться и проводить тестирование на абсолютно новых данных. В KNIME данная функция реализуется благодаря двум узлам (X-partitioner и X-aggregator) (рис. 10). В узле X-partitioner выставляется колонка, которую нода будет разделять на равные части и выбирается число циклов, которое пройдут данные перед их оцениванием. X-aggregator позволяет запустить цикл вновь, подавая на обучение новую часть данных. Использование данных узлов, помогло справиться с проблемой переобучения модели машинного обучения, что позволило создать исследование более точным и достоверным.

Рис. 10. Кросс-валидация

Заключение. На данный момент наблюдается рост преступлений совершённых с помощью информационных технологий. Почти 50% преступлений в данной сфере приходятся на взлом кодов от банковских карт населения, которые злоумышленники совершают с помощью фишинговых атак. Существующие методы защиты от фишинга не всегда справляется с детектированием угрозы. Использование машинного обучения в перспективе может помочь специалистам в сфере информационной безопасности и компаниям фильтровать потенциально фишинговые сайты, письма и уведомления [19].

Проведённое исследование демонстрирует изобретательность злоумышленников в создании новых методов фишинговых атак, обнаружение которых становится более трудной и долгой задачей для стандартных методов детектирования фишинга. Испытания, проведённые с моделями машинного обучения, показывают высокие результаты точности обнаружения фишинговых сайтов. Тестирование искусственного интеллекта показывает, что модели способны выдавать высокую точность, охватывая полный объём данных, вводимый в модель.

Использование машинного обучения в обнаружении потенциально опасных сайтов и детектировании фишинговых атак перспективно, потому что обучение и дальнейшее использование искусственного интеллекта позволит развивать данную сферу, создавая и усовершенствуя модели машинного обучения, позволяя им быстрее и точнее находить закономерности в параметрах и прогнозировать легитимность сайтов, писем и уведомлений [20].

Благодарность: *Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-71-30007, https://rscf.ru/project/25-71-30007/.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Завьялов А.Н.* Интернет-мошенничество (фишинг): проблемы противодействия и предупреждения // Baikal Research Journal. – 2022. – Т. 13, № 2. – URL: https://brj-bguep.ru/reader/article.aspx?id=25141 (дата обращения: 28.03.2025).
2. History of Phishing // Phishing. – URL: https://www.phishing.org/history-of-phishing (дата обращения: 28.03.25).
3. *Данько О.С., Медведева Т.А.* Исследование техник фишинга и методов защиты от него // Молодой исследователь Дона. – 2021. – № 3 (30). – С. 60-61.
4. *Gupta B.B., Tewari A., Jain A.K. et al.* Fighting against phishing attacks: state of the art and future challenges // Neural Comput & Applic. – 2017. – 28. – P. 3629-3654. – https://doi.org/10.1007/s00521-016-2275-y (дата обращения: 28.03.2025).
5. *Сангани Крис*. Борьба с кражей личных данных // The Banker. – Сентябрь 2003. – 70 (9). – 5354. – URL: https://www.thebanker.com/content/fc6f8422-54f4-5641-a89d-607d895fe7cc.
6. *McCall Tom.* (December 17, 2007). Gartner Survey Shows Phishing Attacks Escalated in 2007; More than $3 Billion Lost to These Attacks // Gartner. Archived from the original on November 18, 2012. Retrieved December 20, 2007. – URL: https://web.archive.org/web/20121118162442/http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=565125.
7. Cisco. Целевой фишинг // ТЕХНО Н. – URL: https://technon.ru/upload/pdf/ironport_targeted_phishing.pdf (дата обращения: 28.03.2025).
8. *Афанасьева Н.С., Елизаров Д.А., Мызникова Т.А.* Классификация фишинговых атак и меры противодействия им // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 5 (89). – С. 169-182.
9. Фишинговые письма: как их распознать и не стать их жертвой // Kaspersky. – URL: https://www.kaspersky.ru/resource-center/preemptive-safety/phishing-prevention-tips (дата обращения: 28.03.2025).
10. Как работает фишинг через поисковые системы? // keeper. – URL: https://www.keepersecurity.com/blog/ru/2023/04/12/what-is-search-engine-phishing/ (дата обращения: 28.03.2025).
11. Making the world’s information safely accessible // Google Safe Browsing. – URL: https://safebrowsing.google.com (дата обращения: 29.03.2025).
12. Here’s why people are saying two-factor authentication isn’t perfect // Digitaltrends. – URL: https://www.digitaltrends.com/computing/why-two-factor-authentication-isnt-perfect/ (дата обращения: 29.03.2025).
13. *Корнюхина С.П., Лапонина О.Р.* Исследование возможностей алгоритмов глубокого обучения для защиты от фишинговых атак // International Journal of Open Information Technologies. – 2023. – Т. 11, № 6. – С. 163-174.
14. *Boyle P., Shepherd L.A.* Mailtrout: a machine learning browser extension for detecting phishing emails // 34th British HCI Conference. – BCS Learning & Development, 2021. – P. 104-115.
15. CyberSecurity: BookMyShow ads. – URL Analysis // kaggle. – URL: https://www.kaggle.com/datasets/shibumohapatra/book-my-show (дата обращения: 04.04.2025).
16. KNIME Analytics Platform // KNIME. – URL: https://www.knime.com/knime-analytics-platform (дата обращения: 04.04.2025).
17. *Асито Ф.* Предсказательная аналитика с KNIME: пер. с англ. А.Ю. Гинько. – М.: ДМК Пресс, 2025. – 360 с.
18. *Боровиков М.М.* Проблемы противодействия транснациональным преступным сообществам в условиях трансформирующегося мира // Экономика, финансы, проектное управление и социальная система России: подходы и перспективы в условиях устойчивого цифрового развития. Краснодар, 20 мая 2022 года. – URL: https://krasnodar.fa.ru/upload/constructor/a74/jr1ym9fbu4a1p6dq3me0z4do0s700f41.pdf.
19. *Антонова Т.С., Смирнов В.М.* Фишинг как неизученное киберпреступление // StudNet. – 2021. – Т. 4, №. 6. – С. 69-75.
20. *Отахонов А.А.* Обнаружение и оценка фишинговых url-адресов с использованием алгоритмов машинного обучения // Al-Farg’oniy avlodlari. – 2024. – № 4. – С. 382-390.

REFERENCES

1. *Zav'yalov A.N.* Internet-moshennichestvo (fishing): problemy protivodeystviya i preduprezhdeniya [Internet fraud (phishing): problems of counteraction and prevention], *Baikal Research Journal,* 2022, Vol. 13, No. 2. Available at: https://brj-bguep.ru/reader/article.aspx?id=25141 (accessed 28 March 2025).
2. History of Phishing, *Phishing*. Available at: https://www.phishing.org/history-of-phishing (accessed 28 March 2025).
3. *Dan'ko O.S., Medvedeva T.A.* Issledovanie tekhnik fishinga i metodov zashchity ot nego [Research of phishing techniques and methods of protection against it], *Molodoy issledovatel' Dona* [Young researcher of the Don], 2021, No. 3 (30), pp. 60-61.
4. *Gupta B.B., Tewari A., Jain A.K. et al.* Fighting against phishing attacks: state of the art and future challenges, *Neural Comput & Applic*., 2017, 28, pp. 3629-3654. Available at: https://doi.org/10.1007/s00521-016-2275-y (accessed 28 March 2025).
5. *Sangani Kris.* Bor'ba s krazhey lichnykh dannykh [Fighting identity theft], *The Banker,* Sentyabr' 2003, 70 (9), 5354. Available at: https://www.thebanker.com/content/fc6f8422-54f4-5641-a89d-607d895fe7cc.
6. *McCall Tom.* (December 17, 2007). Gartner Survey Shows Phishing Attacks Escalated in 2007; More than $3 Billion Lost to These Attacks, *Gartner. Archived from the original on November 18, 2012. Retrieved December 20, 2007*. Available at: https://web.archive.org/web/20121118162442/http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=565125.
7. Cisco. TSelevoy fishing [Cisco. Spear phishing], *TEKhNO N* [TECHNO N]. Available at: https://technon.ru/upload/pdf/ironport_targeted_phishing.pdf (accessed 28 March 2025).
8. *Afanas'eva N.S., Elizarov D.A., Myznikova T.A.* Klassifikatsiya fishingovykh atak i mery protivodeystviya im [Classification of phishing attacks and countermeasures], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2022, No. 5 (89), pp. 169-182.
9. Fishingovye pis'ma: kak ikh raspoznat' i ne stat' ikh zhertvoy [Phishing emails: how to recognize them and avoid becoming their victim], *Kaspersky*. Available at: https://www.kaspersky.ru/resource-center/preemptive-safety/phishing-prevention-tips (accessed 28 March 2025).
10. Kak rabotaet fishing cherez poiskovye sistemy? [How does phishing through search engines work?], *keeper*. Available at: https://www.keepersecurity.com/blog/ru/2023/04/12/what-is-search-engine-phishing/ (accessed 28 March 2025).
11. Making the world's information safely accessible, *Google Safe Browsing*. Available at: https://safebrowsing.google.com (accessed 28 March 2025).
12. Here's why people are saying two-factor authentication isn't perfect, *Digitaltrends*. Available at: https://www.digitaltrends.com/computing/why-two-factor-authentication-isnt-perfect/ (accessed 28 March 2025).
13. *Kornyukhina S.P., Laponina O.R.* Issledovanie vozmozhnostey algoritmov glubokogo obucheniya dlya zashchity ot fishingovykh atak [Study of the capabilities of deep learning algorithms for protection against phishing attacks], *International Journal of Open Information Technologies,* 2023, Vol. 11, No. 6, pp. 163-174.
14. *Boyle P., Shepherd L.A.* Mailtrout: a machine learning browser extension for detecting phishing emails, *34th British HCI Conference*. BCS Learning & Development, 2021, pp. 104-115.
15. CyberSecurity: BookMyShow ads. URL Analysis, *kaggle*. Available at: https://www.kaggle.com/datasets/shibumohapatra/book-my-show (accessed 04 April 2025).
16. KNIME Analytics Platform, *KNIME*. Available at: https://www.knime.com/knime-analytics-platform (accessed 04 April 2025).
17. *Asito F.* Predskazatel'naya analitika s KNIME [Predictive analytics with KNIME transl. from engl. by A.Yu. Gin'ko. Moscow: DMK Press, 2025, 360 p.
18. *Borovikov M.M.* Problemy protivodeystviya transnatsional'nym prestupnym soobshchestvam v usloviyakh transformiruyushchegosya mira [Problems of counteracting transnational criminal communities in the context of a transforming world], *Ekonomika, finansy, proektnoe upravlenie i sotsial'naya sistema Rossii: podkhody i perspektivy v usloviyakh ustoychivogo tsifrovogo razvitiya* [Economy, finance, project management and the social system of Russia: approaches and prospects in the context of sustainable digital development]. Krasnodar, 20 May 2022. Available at: https://krasnodar.fa.ru/upload/constructor/a74/jr1ym9fbu4a1p6dq3me0z4do0s700f41.pdf.
19. *Antonova T.S., Smirnov V.M.* Fishing kak neizuchennoe kiberprestuplenie [Phishing as an unexplored cybercrime], *student,* 2021, Vol. 4, No. 6, pp. 69-75.
20. *Otakhonov A.A.* Obnaruzhenie i otsenka fishingovykh url-adresov s ispol'zovaniem algoritmov mashinnogo obucheniya [Detection and evaluation of phishing URLs using machine learning algorithms], *Al-Farg'oniy avlodlari,* 2024, No. 4, pp. 382-390.

Лапина Мария Анатольевна – Северо-Кавказский федеральный университет; e-mail: mlapina@ncfu.ru; г. Ставрополь, Россия; к.ф.-м.н.; доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики; ORCID: 0000-0001-8117-9142.

Лукьянов Дмитрий Александрович – Северо-Кавказский федеральный университет; e-mail: ilia.alekseev.kenig@gmail.com; г. Ставрополь, Россия; кафедра вычислительной математики и кибернетики; студент; ORCID: 0009-0009-7203-0309.

Лапин Виталий Геннадьевич – Северо-Кавказский федеральный университет; e-mail: vitlx@yandex.ru; г. Ставрополь, Россия; к.ф.-м.н.; доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики; ORCID: 0000-0002-0611-7002.

Кучеров Николай Николаевич – Северо-Кавказский федеральный университет; e-mail: nik.bekesh@gmail.com; г. Ставрополь, Россия; к.т.н.; ведущий научный сотрудник департамента науки СКФУ; ORCID: 0000-0003-0337-0093.

Lapina Maria Anatolyevna – North Caucasus Federal University; e-mail: mlapina@ncfu.ru; Stavropol, Russia; cand. of phys. and math. sc.; associate professor of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics; ORCID: 0000-0001-8117-9142.

Lukyanov Dmitry Alexandrovich – North Caucasus Federal University; e-mail: ilia.alekseev.kenig@gmail.com; Stavropol, Russia; the Department of Computational Mathematics and Cybernetics; ORCID: 0009-0009-7203-0309.

Lapin Vitalii Gennadievich – North Caucasus Federal University; e-mail: vitlx@yandex.ru; Stavropol, Russia; cand. of phys. and math. sc.; associate professor of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics; ORCID: 0000-0002-0611-7002.

Kucherov Nikolay Nikolaevich – North Caucasus Federal University; e-mail: nik.bekesh@gmail.com; Stavropol, Russia; cand. of eng. sc.; leading researcher of the Department of Science; ORCID: 0000-0003-0337-0093.

УДК 007.52:004.81:339.37 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-262-272

М.А. Хапова, К.Ч. Бжихатлов, Л.Б. Кокова

РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОГО РОБОТА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПРОДАВЦА - КОНСУЛЬТАНТА В СЕТЯХ РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ

Активное увеличение доли крупных сетевых магазинов в торговом секторе повышает спрос на сотрудников подобных сетей. При этом, с ростом оборота крупных магазинов растут и требования к своевременной выкладке товара на стеллажах. По оценкам самих ритейлеров, потери от неправильной или несвоевременной выкладки товара могут достигать 5% от общего годового оборота. Учитывая значительный объем оборота крупных сетевых ретейлеров, и заметную текучесть кадров, проблему автоматизации выкладки товара в сетевых магазинах можно считать актуальной. В данной работе представлены результаты разработки автономной робототехнической системы, которая может обеспечить бесперебойный контроль заполнения стеллажей и своевременную выкладку товара. По результатам опроса представителей крупных торговых сетей определены требования к автономной системе контроля и расстановки товаров в магазине. В частности, определены требования к возможностям интеллектуальной системы управления роботом, особенности конструкции и аппаратной реализации роботов, требования к возможностям системы взаимодействия с сотрудниками и покупателями в магазине и предпочтения к внешнему виду и пользовательскому интерфейсу робота. На основе выявленных требований ритейлеров разработан прототип автономного робота для работы в торговых залах. Основа робота представляет собой транспортный модуль с двумя моторколесами и парой рулевых колес, на котором установлен антропоморфный узел с двумя манипуляторами. Манипуляторы выполнены в виде рук человека и имеют весь набор необходимых степеней свободы. Кроме того, в статье представлена архитектура системы управления автономным роботом. За управление роботом отвечает интеллектуальная система принятия решений и управления, основанной на базе мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры, моделирующей процессы, протекающие в головном мозге человека. Конструкция и мехатронная часть робота были протестированы в реальных условиях: в торговых залах розничного магазина в г. Нальчик в присутствии продавцов-консультантов и покупателей. В дальнейшем планируются работы по доработке и обучению интеллектуальной системы принятия решений.

Ритейл, роботы; продавец-консультант; искусственный интеллект; инвентаризация полок; мультиагентные нейрокогнитивные архитектуры.

M.A. Khapova, K.Ch. Bzhikhatlov, L.B. Kokova

DEVELOPMENT OF AN AUTONOMOUS ROBOT TO PERFORM THE FUNCTIONS OF A SALES - CONSULTANT IN RETAIL NETWORKS

The active increase in the share of large chain stores in the retail sector increases the demand for employees of such networks. At the same time, with the growth of the turnover of large stores, the requirements for timely display of goods on the shelves also grow. According to the estimates of the retailers themselves, losses from incorrect or untimely display of goods can reach 5% of the total annual turnover. Given the significant turnover of large chain retailers and noticeable staff turnover, the problem of automation of product display in chain stores can be considered relevant. This paper presents the results of the development of an autonomous robotic system that can ensure uninterrupted control of filling of shelves and timely display of goods. Based on the results of a survey of representatives of large retail chains, the requirements for an autonomous system for monitoring and placing goods in a store are determined. In particular, the requirements for the capabilities of an intelligent robot control system, design features and hardware implementation of robots, requirements for the capabilities of the system of interaction with employees and customers in the store and preferences for the appearance and user interface of the robot are determined. Based on the identified requirements of retailers, a prototype of an autonomous robot for work in sales areas has been developed. The basis of the robot is a transport module with two motor wheels and a pair of steering wheels, on which an anthropomorphic unit with two manipulators is installed. The manipulators are made in the form of human hands and have a full set of necessary degrees of freedom. In addition, the article presents the architecture of the autonomous robot control system. The robot is controlled by an intelligent decision-making and control system based on a multi-agent neurocognitive architecture that simulates the processes occurring in the human brain. The design and mechatronic part of the robot were tested in real conditions: in the sales areas of a retail store in Nalchik in the presence of sales consultants and customers. In the future, work is planned to refine and train the intelligent decision-making system.

Retail, robots; sales assistant; artificial intelligence; shelf inventory; multi-agent neurocognitive architectures.

Введение. В настоящее время сети розничной торговли теряют около 5% годовой выручки от несвоевременной выкладки товаров. Для сетей розничной торговли, включающих в себя тысячи супер- и гипермаркетов, это огромная сумма. Например, выручка такого финансового гиганта, как X5 Retail Group, по итогам 2024 года составила 3,71 трлн.руб. [1]. Таким образом, предположительно, они теряют около 185,5 млрд. руб. К таким цифрам приводят ряд существенных проблем, которые возникают в сетях розничной торговли из-за несвоевременной выкладки товаров:

1) потеря клиентов – в случае, если товары не выставлены на полки вовремя, покупатели могут уйти без покупки или приобрести товар у конкурентов;

2) снижение продаж – несвоевременная выкладка товаров может привести к снижению объёмов продаж, так как покупатели не смогут найти нужные товары на полках;

3) увеличение издержек – неэффективное использование рабочего времени сотрудников, дополнительные расходы на срочную доставку товаров и другие издержки могут возникнуть из-за необходимости срочно исправить ситуацию с выкладкой товаров;

4) ухудшение репутации – проблемы с выкладкой товаров могут негативно сказаться на репутации магазина, что может привести к уменьшению числа покупателей.

5) нарушение условий сотрудничества – несоблюдение сроков выкладки товаров может вызвать недовольство поставщиков и дистрибьюторов, что может повлиять на условия сотрудничества;

6) дефицит товаров – в случае несвоевременного пополнения запасов товаров на складе, может возникнуть их дефицит на полках магазина. Это также может привести к потерям продаж и недовольству клиентов;

7) неравномерная нагрузка на персонал - проблемы с выкладкой могут вызвать неравномерную нагрузку на сотрудников магазина, что усложнит планирование работы персонала и может привести к дополнительным затратам на оплату труда;

8) сложности с управлением запасами - несвоевременное пополнение полок товарами может вызвать сложности с управлением запасами, что приведёт к неэффективному использованию ресурсов и увеличению издержек.

Роботизация в розничной торговле – это использование роботов и автоматизированных систем для выполнения различных задач, таких как складирование, логистика, обслуживание клиентов и т.д. [2] Приведем несколько примеров роботы роботов в этой сфере:

1. Складские роботы. Данные роботы используются для перемещения товаров на складе, их упаковки и сортировки. Они могут работать круглосуточно и без перерывов, что позволяет ускорить процесс обработки заказов и снизить вероятность ошибок. В 2024 году в России сеть «ВкусВилл» на своих складах распределительных центров запустила AGV-роботов, способных без участия человека перевозить грузы. К роботам, работающим на складах, также можно отнести дронов, которые могут использоваться для сканирования штрихкодов на больших высотах и в труднодоступных местах, а также для создания 3D-моделей складов.

2. Роботы-консультанты (социальные роботы). Они могут предоставлять информацию о товарах и услугах, помогать клиентам найти нужные товары и отвечать на их вопросы. Они особенно полезны в крупных магазинах, где клиенты могут потеряться среди большого количества товаров. В Лаборатории автономных систем и биомехатроники, кафедры машиностроения и промышленной инженерии, Университета Торонто, Канада занимаются разработкой робота, способного находить товары в магазинах с большим количеством товаров. При построении маршрута будет использоваться технология ContextSLAM. Данная технология будет обеспечивать роботу ориентацию в сложной среде магазинов розничной торговли с большим количеством полок. Робот сможет разумно использовать геометрическую и контекстную информацию в пределах контекстной карты для передвижения с целью нахождения продуктов в неизвестных средах в присутствии динамичных людей [3]. Примером использования в России робота-консультанта может служить Промобот.

3. Роботы для доставки товаров. В некоторых магазинах используются роботы для доставки товаров от склада до кассы или даже до автомобиля клиента. Использование таких роботов позволяет сократить время доставки и освободить сотрудников для других задач [4, 5]. Примером робота для доставки товаров может быть роботизированная тележка. Роботизированные тележки могут перевозить товары по торговому залу и по складу, а также автоматически сканировать их штрихкоды. Роботизированные тележки могут быть интегрированы с системами управления для автоматического обновления данных о товарах. В России сделали первый шаг на пути к созданию таких тележек в 2020 году. В сети «ВкусВилл» были протестированы «умные» тележки со сканером штрихкода [6].

4. Роботы для инвентаризации. Они могут автоматически сканировать штрихкоды товаров и обновлять информацию о наличии товаров на складе, находить бреши на полках или неправильно расставленный товар, пополнять полки при необходимости [7]. Использование такого робота помогает избежать ошибок при инвентаризации и обеспечить точность данных. Примерами таких роботов могут служить мобильные роботы с манипуляторами. Данные роботы оснащены манипуляторами, которые позволяют им перемещать товары и выполнять другие задачи [8, 9].

5. Роботы с манипуляторами являются дорогим и сложным решением. На данный момент, есть разработки роботов без манипуляторов, которые могут взять на себя часть процесса инвентаризации. Ученые факультета машиностроения Инженерной школы имени Р. М. Д. Сингхгада, Индия, Технологического университета COEP, Индия и Университета прикладных наук Хофа, Германия ведут работы по разработке робота для контроля и помощи при проведении инвентаризации с помощью технологии LiDAR и SLAM. Опубликованное данными учеными исследование описывает разработку способов передвижения робота без столкновений, в целях нахождения кратчайшего пути передвижения. В своей разработке ученые из Индии и Германии предложили алгоритм SLAM для статической среды. Так же, в целях автоматизации используются RFID – технологии, микроконтроллер Arduino UNO и LiDAR VL53L0X. В целях хранения и отображения информации микроконтроллер и LiDAR интегрированы с MATLAB. Данная разработка будет использоваться на складах (оказание помощи, уборка и обработка материалов), так же можно будет использовать в домашних условиях [10].

6. Роботы для уборки. Они используются для уборки полов, стен и других поверхностей в магазинах. Использование таких роботов позволяет поддерживать чистоту и порядок в торговых точках. Примеров таких роботов может служить вакуумный робот-уборщик компании 168robotics, созданный российскими разработчиками. Данный робот способен убрать до 90 тыс. кв.м. в сутки. На работе установлены стереокамеры, радар собственного производства, лидары, обзорные камеры и ультразвуковые датчики.

7. Роботы для анализа данных. Роботы собирают и анализируют данные о продажах, поведении клиентов и эффективности работы магазина. Это помогает принимать обоснованные решения и улучшать работу магазина.

8. Автоматизированные системы управления запасами. Автоматизированные системы позволяют автоматически отслеживать запасы товаров и заказывать новые поставки, когда это необходимо [11, 12]. На российском рынке одними из разработчиков автоматизированной системы управления запасами является ИТ-компания «Синаптик». Компания «Синаптик» предлагает разработку систем управления складом (WMS) под каждого клиента индивидуально, которые помогут не только справляться с текущими задачами, но и полностью оптимизировать все процессы, связанные с запасами и логистикой.

9. Роботизированные кассы. Данный вид роботов позволяет ускорить процесс обслуживания клиентов на кассе и уменьшить очереди [13]. Ученые из Санкт-Петербургского политехнический университет Петра Великого провели исследование, направленное на выявление эффективности использования роботизированных касс в торговле [14]. В результате проведенного ими исследования, они выявили, что роботы-кассиры, могут без перерыва работать 12 часов и заменить 2-3 кассиров, поэтому являются эффективным решением для бизнеса в области торговли. Также они выявили, что на ряду с положительными эффектами, есть и отрицательные. Как и бельгийские ученые, они сделали вывод, что есть консервативные покупатели, которые не хотят иметь дело с роботами.

10. Системы автоматического сбора данных. Они используют технологии сканирования и распознавания для автоматического сбора информации о продажах и запасах [15, 16].

11. Интеллектуальные системы управления освещением и температурой. Они автоматически регулируют освещение и температуру в зависимости от времени суток и погодных условий, создавая комфортные условия для покупателей и сотрудников [17–19].

Готовность разрабатываемых технологий к внедрению в среду розничной торговли имеет важное значение, но не менее важно изучить готовность потребителей к взаимодействию с роботами в условиях данной среды [20–22]. Ученые из Бельгии с кафедры маркетинга, Лёвенского католического университета и кафедры лингвистики Антверпенского университета, провели исследования на тему готовности покупателей розничных магазинов к взаимодействию с роботами-помощниками. В своем исследовании они сравнивали отзывы покупателей на качество обслуживания после взаимодействия с человеком и взаимодействия с роботом, по сценариям, которые возможны в среде розничной торговли. Выводом данного исследования стало то, что оценка качества обслуживания при взаимодействии покупателя с человеком оказалось выше, чем при взаимодействии покупателя с роботом. Но, при противопоставлении итогов взаимодействия покупателей, с высокой степенью положительной настроенности к внедрению робота в человеческую среду, с роботом, статистически никак не отличались от итогов взаимодействия с человеком. Существенная статистическая разница была, при противопоставлении итогов взаимодействия низко положительно настроенных покупателей роботам, т.к. качество обслуживания человека роботом они оценили существенно ниже. Ученые также отметили, что ни пол, ни возраст статистически никак не повлияли на результат оценки качества обслуживания [23]. Учеными из Индии совместно с бизнес-школой NEOMA, Франция, были проведены исследования барьеров, стоящих перед внедрением социальных роботов в розничную среду гипермаркетов Индии. Данное исследование было разделено на два этапа. Первый этап рассматривал качественные характеристики барьеров, а второй взаимосвязь выявленных барьеров. Основными барьерами явились: страх потери работы, страх потери индивидуальности и идентичности, распространение личных данных [24].

Анализ требований к разрабатываемому роботу для выполнения функций продавца консультанта. С целью выявления основных целей и задач создания автономного робота для выполнения функций продавца-консультанта в сетях розничной торговли «RetailMultiBot», условий его применения, требуемых значений основных параметров и характеристик робота был проведен опрос руководителей инновационных центров крупных ритейлеров, таких как X5Retail Group, METRO, Ашан, Магнит и Азбука Вкуса. Опрос проводился в 2021 году. По итогам данного опроса, составлен список технических требований к разрабатываемому роботу «RetailMultiBot»:

1. Требования к интеллектуальной системе управления:

- автономное перемещение по торговому залу в условиях активного перемещения покупателей
- выявление пустых полок в магазине
- определение вида и необходимого количества отсутствующего на полках товара;
- проверка актуальность ценников;
- подключение к информационным системам ритейлера для автоматического уточнения цен и заказа недостающей продукции

2. Требования к конструкции и аппаратной реализации:

- маневренность (робот должен перемещаться по торговому залу не меша потоку покупателей);
- безопасность покупателей (отсутствие острых углов, система быстрого торможения и отключения манипулятора, система обнаружения столкновений);
- точность манипуляторов (перемещение товара без угрозы его деформации, возможность размещения товаров при плотной расстановке на полках);
- скорость работы (робот должен выполнять выкладку быстрее человека (20- 35 мин. на расстановку 1 тележки с товаром, около 10 тележек в день);
- надежность конструкции (конструкция должна выдерживать незначительные удары, падение товаров на робота и т.д. без значительного ухудшения работоспособности и внешнего вида).

3. Требования к интерфейсу робота:

- реализация естественно-языкового взаимодействия с сотрудниками и покупателями (получение команд от менеджера, ответы на вопросы покупателей)
- возможность озвучки персональных предложений покупателю;
- консультация покупателей по товару.

4. Экономические критерии:

- не высокая стоимость робота (в сравнении с исключаемыми потерями или приростом прибыли после внедрения робота);
- не высокая стоимость обслуживания;
- тиражируемость;
- простое обслуживание и доступность ремонта.

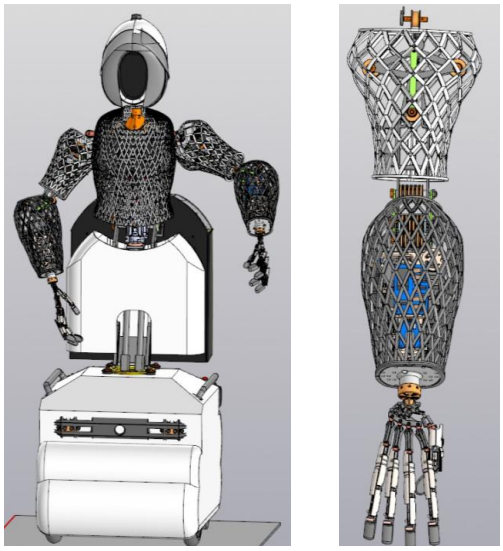
5. Требования к дизайну:

- дружелюбный внешний вид;
- ненавязчивый дизайн, робот не должен привлекать все внимание к себе;
- возможность брендирования (покраска корпуса в цвета сети магазинов, вывод логотипов на экран);

На основе выявленных требований определены задачи робота, в первую очередь это выкладка отсутствующего товара на полки (gap checking) и обеспечение правильности выкладки товара (мерчандайзинг). Для этого робот должен обеспечивать построение карты торгового зала и автономное перемещение по залу. Система распознавания должна определять препятствия, сотрудников, покупателей, стеллажи, товары на них, отсутствие товаров и ценники. Манипулятор робота должен иметь возможность перемещать тележку по залу, загружать и разгружать ее и раскладывать товары по полкам. Кроме того, робот должен иметь бортовую систему связи, подключенную к информационной системе продавца.

Автономный робот для выполнения функций продавца консультанта. На основе представленных требований разработан прототип автономного робота для работы в торговых залах. В качестве основы для робота-ритейлера использовалась многоцелевая

исследовательская робототехническая платформа Муром-ИСП, разработанная в КБНЦ РАН. Нижняя часть робота представляет собой транспортный блок с двумя моторколесами и парой рулевых колес, на котором установлен антропоморфный узел с двумя манипуляторами. Манипуляторы выполнены имеют весь набор степеней свободы, присущий руке человека. В качестве привода используются легки сервопривода непосредственно на манипуляторе и более тяжелые двигателя, приводящие манипулятор в движение за счет тросиков. Трехмерная модель робота в целом и его манипулятора приведена на рис. 1, а внешний вид прототипа на рис. 2.



а б

Рис. 1. Трехмерные модели робота для выполнения функций продавца консультанта (а) и его манипулятора (б)

Каждая фаланга кисти закреплена на неразъемном шарнире и имеет три степени свободы. Сами фаланги оснащены датчиками изгиба и датчиками степени нажатия. Корпус робота изготовлен из гибкого пластика, что позволит минимизировать угрозу нанесения вреда людям или товару в магазине.

За управление роботом отвечает бортовой вычислитель, состоящий из высокопроизводительного персонального компьютера и распределенной сети микроконтроллеров, которые занимаются сбором данных и передачей команд внутри сенсорной и эффекторной подсистем робота. Схема аппаратной реализации робота приведена на рис. 3.

Рис. 2. Внешний вид прототипа робота для выполнения функций продавца консультанта

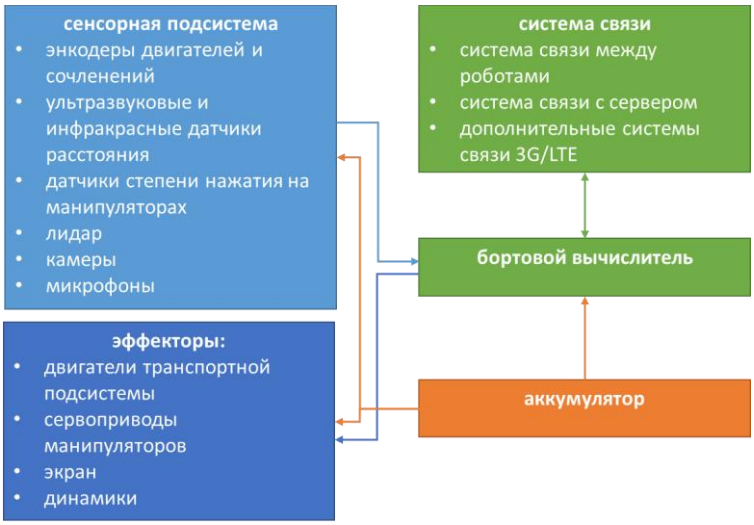


Рис. 3. Схема аппаратной реализации автономного робота для выполнения функций продавца консультанта

В качестве системы энергообеспечения используется легкосъемный литиевый аккумулятор с возможностью быстрой замены или зарядки непосредственно в роботе. Для обеспечения связи на борту установлен WiFi и 3G роутеры. Сенсорная подсистема робота состоит из набора датчиков угла поворота, установленных на всех двигателях робота и сочленениях манипулятора. Кроме того, по всему корпусу установлена матрица дальномером, позволяющих роботу ориентироваться в пространстве и избегать столкновения с людьми и препятствиями. Кроме дальномеров робот оснащен лидаром, что также повышает точность получаемой роботом модели расположения объектов вокруг. Для распознавания объектов и определения их положения в «голове» робота установлены две видеокамеры. Там же расположены микрофоны и динамики, которые нужны для обеспечения естественно-языкового взаимодействия робота с сотрудниками и посетителями магазина. Основную часть «головы» занимает дисплей, который также используется для обеспечения взаимодействия с людьми или для отладки робота. Кроме того, на роботе установлен ряд дополнительных датчиков системы энергообеспечения (датчики напряжения питания и температуры батареи), навигации (GPS, 10 осевой инерциальный сенсор, предполагается реализация локальной навигации за счет RFID меток), безопасности (датчики столкновения, вскрытия корпуса) и т.д. При этом, использование сети микроконтроллеров для сбора данных позволяет достаточно быстро изменять набор сенсоров и эффекторов с учетом требований конкретных заказчиков.

Архитектура системы управления автономным роботом для выполнения функций продавца консультанта. Управления автономным роботом требует реализации интеллектуальной системы распознавания образов, принятия решений и управления манипуляторами. В качестве основы системы управления для робота используются мультиагентные нейроконитивные архитектуры систем принятия решений [25]. Подобный формализм построен на основе модели нейрона головного мозга как активного агента, имеющего собственную целевую функцию и базу знаний. Соответственно, интеллектуальное принятия решений в условиях неопределенности можно реализовать за счет имитационного моделирования мультиагентной системы, состоящей из подобных агентов-нейронов, обменивающихся сообщениями и энергией.

Система управления роботом состоит из нескольких модулей, работающих совместно (рис. 4). Программа управления должна постоянно опрашивать сенсорную подсистему робота и собирать информацию из информационной системы магазина. Эти данные позволят выполнять задачу распознавания образов с камеры (сотрудников, покупателей, стеллажей, товаров и ценников), микрофонов (команды сотрудников и просьбы пользователей) и остальных.

Рис. 4. Структура системы управления автономным роботом для выполнения функций продавца консультанта

После обработки полученных данных система может строить мультиагентную онтологию среды магазина, на основе которой строится модель текущего состояния внешней среды. С учетом результатов распознавания команд сотрудников и посетителей магазина система строит модель целевого состояния (полки заполнены товаром, указан правильный ценник, покупателю передан интересующий его товар). Далее, имея модель текущего и желаемого состояния система принятия решений должна построить план достижения цели, который в виде конкретных команд передается на эффекторы робота (двигатели, дисплей и динамики).

Конструкция и мехатронная часть робота прошли тестирования в реальных условиях (в магазине сети «Караван» в г. Нальчик). На данном этапе видеться доработка системы управления, в частности дорабатываются алгоритмы распознавания данных с камер робота.

Заключение. Как показал опрос, задача автоматизации мониторинга и выкладки товара на полках крупных магазинов является кране актуальной для крупных торговых сетей. Учитывая возможные потери от неправильной или несвоевременной выкладки товара, составляющие до 5% годового оборота, задачу создания робота для выполнения функций продавца консультанта можно считать актуальной.

Разработанный автономный робот может обеспечивать мониторинг и выкладку товара на полках магазинов в автономном режиме, а также выполнять указания сотрудников магазина и взаимодействовать с пользователями. На текущем этапе разработки реализована аппаратная часть робота и ведутся работы по разработке и обучению интеллектуальной системы принятия решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Отчет о финансовых и операционных результатах X5 Retail Group за 2024 г. // Официальный сайт X5 Retail Group.
2. *Петров С.К.* Роботизация бизнес-процессов на примере предприятий сферы розничной торговли // Инновации и инвестиции. – 2021. – № 4. – С. 140-143.
3. *Dworakowski D. Thompson C., Pham-Hung M., & Nejat G.* A Robot Architecture Using ContextSLAM to Find Products in Unknown Crowded Retail Environments // Robotics. – 2021. – Vol. 10, No. 4. – P. 110.
4. *Сорокин В.И.* Перспективы внедрения наземных роботов-курьеров в управление логистическими процессами сервисов доставки // Молодежная неделя науки ИПМЭиТ: Сб. трудов Всероссийской студенческой научно-учебной конференции. В 6-ти частях. Том Часть 3. Санкт-Петербург, 02–04 декабря 2021 года. – СПб.: ФГАОУВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2021. – С. 61-64. – EDN QBKSDH.

5. *Новосёлова Е.Е., Молдабаева П.С., Белякова Е.В.* Внедрение робототехники в курьерскую деятельность // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2022. – № 3. – С. 280-282.
6. *Медведев И.* В сети ВкусВилл появились «умные» тележки // BFM.RU. – 2020. – Свободный режим доступа: https://www.bfm.ru/news/435921 (дата обращения: 25.02.2025).
7. *Galdelli A., Pietrini R., Mancini A., & Zingaretti P.* Retail Robot Navigation: A Shopper Behavior-Centric Approach to Path Planning // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 50154–50164.
8. *Бахман В.А., Королева А.Н., Царегородцев Е.Л.* Обзор видов и анализ современного состояния рынка промышленных роботов-манипуляторов // МНИЖ. – 2023. – № 2 (128). – С. 2-6.
9. *Гараев Р.А., Рогожников А.О.* Перспектива использования робота-манипулятора в различных отраслях // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития. – 2022. – № 5. – С. 57-60.
10. *Sharma R., Patange A.D., Padalghare R., & Kale R.C.* Development of LiDAR operated inventory control and assistance robot. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers // Journal of Process Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 238. – P. 192-202.
11. *Rahmadya B., Sun R., Takeda S., Kagoshima K., & Umehira M.* A Framework to Determine Secure Distances for Either Drones or Robots Based Inventory Management Systems // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 170153-170161.
12. *Vicente Ó.F., Fernández F., & García J.* Automated market maker inventory management with deep reinforcement learning // Applied Intelligence. – 2023. – Vol. 53, No. 19. – P. 22249-22266
13. *Engström P., Hagen J., Khoshghadam A., & Schneider A.* Effects of electronic cash registers on reported revenue // International Tax and Public Finance. – 2024.
14. *Насаридзе Е.В. Икрамов Р.А.* Анализ эффективности использования роботов-кассиров в торговле // Неделя науки СПбПУ: Матер. научной конференции с международным участием. Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли. Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019. – СПб.: ФГАОУВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2019. – Т. 3. – С. 187-189. – EDN NDJEMV.
15. *Михайлов Д.В.* Анализ практики применения алгоритмов машинного обучения в российских розничных сетях для развития операционной деятельности и разработки маркетинговой стратегии предприятия // Fundamental and applied approaches to solving scientific problems: Сб. научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции. Уфа, 28 апреля 2023. – Уфа: ООО "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2023. – С. 122-141. – EDN JBXWSR.
16. *Губко Ю.А.* Применение CRM системы управления взаимоотношениями с клиентом для розничной торговли // Скиф. Вопросы студенческой науки. – 2020. – № 5-2 (45). – С. 293-297. – EDN CXFTHW.
17. *Островский В.Л.* Интеллектуальная система освещения образовательного учреждения // Форум молодёжной науки. – 2020. – № 6. – С. 4-13.
18. *Чебан А.Н.* Система интеллектуального управления освещением в учебных зданиях // Наука, образование и экспериментальное проектирование. – 2020. – № 1. – С. 464-465.
19. *Байнева И.И.* Системы управления освещением на современном производстве // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: Материалы IV Национальной научно-практической конференции. Казань, 06–07 декабря 2018. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – Т. 2. – С. 589-595. – EDN HLUHXH.
20. *Song C.S., Kim Y.K.* The role of the human-robot interaction in consumers acceptance of humanoid retail service robots // Journal of Business Research. – 2022. – Vol. 146. – P. 489-503.
21. *Subero-Navarro Á., Pelegrín-Borondo J., Reinares-Lara E., & Olarte-Pascual, C.* Proposal for modeling social robot acceptance by retail customers: CAN model + technophobia // Journal of Retailing and Consumer Services. – 2022. – Vol. 64. – P. 102813.
22. *Noble S. M., Mende M.* The future of artificial intelligence and robotics in the retail and service sector: Sketching the field of consumer-robot-experiences // J. of the Acad. Mark. Sci. – 2023. – Vol. 51, No. 4. – P. 747-756.
23. *Roozen I., Raedts M., Yanycheva A.* Are Retail Customers Ready for Service Robot Assistants? // Int J of Soc Robotics. – 2022. – Vol. 15, No. 1. – P. 15-25.
24. *Sindhwani R., Pereira V., Sampat B., Shankar A., Nigam A., & Salwan P.* Exploring barriers to social robot adoption: A mixed-method study in the Indian retail sector // Technological Forecasting and Social Change. – 2025. – Vol. 212. – P. 123923.
25. *Нагоев З.В.* Интеллектика, или мышление в живых и искусственных системах. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2013. – 211 с.

REFERENCES

1. Otchet o finansovykh i operatsionnykh rezul'tatakh X5 Retail Group za 2024g. [Report on financial and operating results of X5 Retail Group for 2024], Ofitsial'nyy sayt X5 Retail Group [Official website of X5 Retail Group].
2. *Petrov S.K.* Robotizatsiya biznes-protsessov na primere predpriyatiy sfery roznichnoy torgovli [Robotization of business processes using the example of retail enterprises], *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments], 2021, No. 4, pp. 140-143.
3. *Dworakowski D. Thompson C., Pham-Hung M., & Nejat G.* A Robot Architecture Using ContextSLAM to Find Products in Unknown Crowded Retail Environments, *Robotics,* 2021, Vol. 10, No. 4, pp. 110.
4. *Sorokin V. I.* Perspektivy vnedreniya nazemnykh robotov-kur'yerov v upravleniye logisticheskimi protsessami servisov dostavki [Prospects for the implementation of ground robot couriers in the management of logistics processes of delivery services], *Molodezhnaya nedelya nauki IPMEiT: Sb. trudov Vserossiyskoy studencheskoy nauchno-uchebnoy konferentsii. V 6-ti chastyakh. Tom Chast' 3. Sankt-Peterburg, 02–04 dekabrya 2021 goda* [Youth Science Week IPMEiT: Collection of proceedings of the All-Russian Student Scientific and Educational Conference. In 6 parts. Vol. Part 3. Saint Petersburg, December 02–04, 2021]. St. Petersburg: Federal State Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", 2021, pp. 61-64. EDN QBKSDH.
5. *Novoselova E.E., Moldabaeva P.S., Belyakova E.V.* Vnedreniye robototekhniki v kur'yerskuyu deyatel'nost' [Introduction of robotics into courier activities], *Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavtiki* [Current problems of aviation and astronautics], 2022, No. 3, pp. 280-282.
6. *Medvedev I.* V seti VkusVill poyavilis' «umnyye» telezhki ["Smart" carts appeared in the VkusVill network], *BFM.RU,* 2020. Free access: https://www.bfm.ru/news/435921 (accessed: 02.25.2025).
7. *Galdelli A., Pietrini R., Mancini A., & Zingaretti P.* Retail Robot Navigation: A Shopper Behavior-Centric Approach to Path Planning, *IEEE Access*, 2024, Vol. 12, pp. 50154–50164.
8. *Bakhman V.A., Koroleva A.N., Tsaregorodtsev E.L.* Obzor vidov i analiz sovremennogo sostoyaniya rynka promyshlennykh robotov-manipulyatorov [Review of types and analysis of the current state of the market for industrial robotic manipulators], *MNIZH* [MNIZH], 2023, No. 2 (128), pp. 2-6.
9. *Garayev R.A., Rogozhnikov A.O.* Perspektiva ispol'zovaniya robota-manipulyatora v razlichnykh otraslyakh [Prospects for using a robotic manipulator in various industries], *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya* [Technical operation of water transport: problems and development paths], 2022, No. 5, pp. 57-60.
10. *Sharma R., Patange A.D., Padalghare R., & Kale R.C.* Development of LiDAR operated inventory control and assistance robot. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Journal of Process Mechanical Engineering*, 2023, Vol. 238, pp. 192-202.
11. *Rahmadya B., Sun R., Takeda S., Kagoshima K., & Umehira M.* A Framework to Determine Secure Distances for Either Drones or Robots Based Inventory Management Systems, *IEEE Access,* 2020, Vol. 8, pp. 170153-170161.
12. *Vicente, Ó. F., Fernández, F., & García, J.* Automated market maker inventory management with deep reinforcement learning, *Applied Intelligence*, 2023, Vol. 53, No. 19, pp. 22249-22266.
13. *Engström P., Hagen J., Khoshghadam A., & Schneider A.* Effects of electronic cash registers on reported revenue, *International Tax and Public Finance*, 2024.
14. *Nasaridze E.V. Ikramov R.A.* Analiz effektivnosti ispol'zovaniya robotov-kassirov v torgovle [Analysis of the effectiveness of using robot cashiers in trade], *Nedelya nauki SPbPU: Materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Institut promyshlennogo menedzhmenta, ekonomiki i torgovli. Sankt-Peterburg, 18–23 noyabrya 2019* [SPbPU Science Week: Proceedings of a scientific conference with international participation. Institute of Industrial Management, Economics and Trade. St. Petersburg, November 18–23, 2019]. Saint Petersburg: FGAOUVO "Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiy universitet Petra Velikogo", 2019, Vol. 3, pp. 187-189. EDN NDJEMV.
15. *Mikhailov D.V.* Analiz praktiki primeneniya algoritmov mashinnogo obucheniya v rossiyskikh roznichnykh setyakh dlya razvitiya operatsionnoy deyatel'nosti i razrabotki marketingovoy strategii predpriyatiya [Analysis of the practice of using machine learning algorithms in Russian retail chains for the development of operational activities and development of an enterprise's marketing strategy], *Fundamental and applied approaches to solving scientific problems: Sb. nauchnykh statey po materialam XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Ufa, 28 aprelya 2023.* [Fundamental and applied approaches to solving scientific problems: Collection of scientific articles based on the materials of the XII International Scientific and Practical Conference. Ufa, April 28, 2023]. Ufa: OOO "Nauchno-izdatel'skiy tsentr "Vestnik nauki", 2023, pp. 122-141. EDN JBXWSR.

16. *Gubko Yu.A.* Primeneniye CRM sistemy upravleniya vzaimootnosheniyami s kliyentom dlya roznichnoy torgovli [Application of a CRM customer relationship management system for retail trade], *Skif. Voprosy studencheskoy nauki* [Skif. Questions of student science], 2020, No. 5-2 (45), pp. 293-297. EDN CXFTHW.
17. *Ostrovsky V.L.* Intellektual'naya sistema osveshcheniya obrazovatel'nogo uchrezhdeniya [Intelligent lighting system for an educational institution], *Forum molodozhnoy nauki* [Forum of Youth Science], 2020, No. 6, pp. 4-13.
18. *Cheban A.N.* Sistema intellektual'nogo upravleniya osveshcheniyem v uchebnykh zdaniyakh [Intelligent lighting control system in educational buildings], *Nauka, obrazovaniye i eksperimental'noye proyektirovaniye* [Science, education and experimental design], 2020, No. 1, pp. 464-465.
19. *Bayneva I.I.* Sistemy upravleniya osveshcheniyem na sovremennom proizvodstve [Lighting control systems in modern production], *Priborostroyeniye i avtomatizirovannyy elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom khozyaystve: Mater. IV Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kazan', 06–07 dekabrya 2018* [Instrumentation and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services: materials of the IV National Scientific and Practical Conference. Kazan, December 06–07, 2018]. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet, 2019, Vol. 2, pp. 589-595. EDN HLUHXH.
20. *Song C.S., Kim Y.K.* The role of the human-robot interaction in consumers acceptance of humanoid retail service robots, *Journal of Business Research,* 2022, Vol. 146, pp. 489-503.
21. *Subero-Navarro Á., Pelegrín-Borondo J., Reinares-Lara E., & Olarte-Pascual, C.* Proposal for modeling social robot acceptance by retail customers: CAN model + technophobia, *Journal of Retailing and Consumer Services,* 2022, Vol. 64, pp. 102813.
22. *Noble S.M., Mende M.* The future of artificial intelligence and robotics in the retail and service sector: Sketching the field of consumer-robot-experiences, *J. of the Acad. Mark. Sci,* 2023, Vol. 51, No. 4, pp. 747-756.
23. *Roozen I., Raedts M., Yanycheva A.* Are Retail Customers Ready for Service Robot Assistants? *Int J of Soc Robotics,* 2022, Vol. 15, No. 1, pp. 15-25.
24. *Sindhwani R., Pereira V., Sampat B., Shankar A., Nigam A., & Salwan P.* Exploring barriers to social robot adoption: A mixed-method study in the Indian retail sector, *Technological Forecasting and Social Change*, 2025, Vol. 212, pp. 123923.
25. *Nagoev Z.V.* Intellectics, or thinking in living and artificial systems [Intellektika, ili myshleniye v zhivykh i iskusstvennykh sistemakh], *Nal'chik: Izdatel'stvo KBNTS RAN* [Nalchik: Publishing House KBNTs RAS], 2013, pp. 211.

Хапова Мадина Аликовна – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: madina.khapova@yandex.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 89280777092; научный сотрудник.

Бжихатлов Кантемир Чамалович – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: haosit13@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 89631663448; к.ф.-м.н.; зав. лабораторией.

Кокова Ляна Башировна – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: lyanakok@yandex.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: 89640394328; м.н.с.

Khapova Madina Alikovna – Federal Scientific Center "Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"; e-mail: madina.khapova@yandex.ru; Nalchik, Russia; phone: +7928077092; research fellow.

Bzhikhatlov Kantemir Chamalovich – Federal Scientific Center "Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"; e-mail: haosit13@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +79631663448; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory.

Kokova Lyana Bashirovna – Federal Scientific Center "Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"; e-mail: lyanakok@yandex.ru; Nalchik, Russia; phone: +79640394328; junior researcher.

УДК 004.853 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-273-284

И.С. Фомин, В.Д. Матвеев, А.Е. Архипов

СОПОСТАВЛЕНИЕ СПАЙКОВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ И НАВИГАЦИИ В КАРТЕ КЛЮЧЕВЫХ КАДРОВ

Задача навигации мобильной робототехнической платформы в известном окружении достаточно давно и качественно решается с использованием плоской карты, которая строится с использованием лидара. Тем не менее, регулярно возникают ситуации, когда платформа по тем или иным причинам не оснащена лидаром или иными активными средствами навигации. При этом на платформе обычно установлена камера, предназначенная для визуального контроля обстановки оператором, которая также может быть использована для навигации при перемещении робота в известной среде. Хорошо известны примеры алгоритмов навигации, основанных на использовании последовательности ключевых кадров, например, визуальный SLAM. При этом в качестве ключевых кадров рассматриваются различные варианты видеоизображений (размытые, маскированные и т.д.). В данной работе в качестве базы для навигации рассматривается когнитивная (не-метрическая, непространственная) карта ключевых кадров, представляющих собой спайковое представление наблюдаемых изображений. В работе проанализирована возможность использования разработанных в ЦНИИ РТК нейроморфных информационно-управляющих элементов для выполнения процедуры сопоставления текущего спайкового изображения со спайковыми изображениями ключевой последовательности. Показано, что путем такого сопоставления может быть определен ближайший к текущему ключевой кадр, а также могут быть подобраны параметры сдвига спайковых представлений, что для когнитивной карты является аналогом локализации и навигации. Приведено описание программного средства эмуляции построения карты и перемещения в ней для экспериментальной отработки предложенных алгоритмов. Выполнен сбор данных и экспериментальное исследование качества работы алгоритмов локализации и навигации. Для чего собрано несколько карт ключевых кадров с различным характером перемещения между кадрами. При определении положения кадра в карте получено качество от 70 до 98 %, при определении направления смещения между кадрами точность составила от 94 до 97 %. Полученные результаты оценены как достаточные для решения поставленных перед алгоритмом задач.

Локализация; навигация; спайковое изображение; нейроморфный информационно-управляющий элемент.

I.S. Fomin, V.D. Matveev, A.E. Arkhipov

SPIKING REPRESENTATIONS COMPARISON FOR LOCALIZATION AND NAVIGATION IN THE KEYFRAME MAP

The task of navigating a mobile robotic platform in a known environment has been efficiently solved for a long time and using a flat passability map, which is built using lidar. Nevertheless, situations regularly arise when, for one reason or another, the platform is not equipped with lidar or other active navigation tools. At the same time, a camera is usually installed on the robotic platform, designed for visual monitoring of the situation by the operator, which can also be used for navigation when moving the robot in a known environment. There are well-known examples of navigation algorithms based on the use of sequences of keyframes, for example, visual SLAM. At the same time, various variants of video images (blurred, masked, etc.) are considered as keyframes. In this paper, a cognitive (non-metric, non-spatial) map of keyframes representing a spiking representation of the observed images is considered as a base for navigation. The possibility of using neuromorphic information control elements developed at the RTC to compare the current spiking representation with all spiking representations of a key sequence is analyzed. It is shown that by such a comparison, the keyframe closest to the current one can be determined, and parameters for the shift of spiking representations can also be selected, which is an analog of localization and navigation for a cognitive map. The description of a software tool for emulating the construction of a map and moving in it for experimental testing of the proposed algorithms is given. Data collection and experimental evaluation of the quality of localization and navigation algorithms have been performed. To do this, we have collected several keyframe maps with different patterns of movement between frames. When determining the position of the frame in the map, the quality was from 70 to 98%, when determining the direction of displacement between frames, the accuracy was from 94 to 97%. The results obtained are assessed as sufficient to solve the tasks assigned to the algorithm.

Localization; navigation; spiking representation; neuromorphic information control element.

Введение. Задача навигации мобильного робототехнического средства в заданном окружении является давно известной задачей, к решению которой существует достаточно большое количество различных подходов. В их числе следует отметить, прежде всего, навигацию на основе клеточной карты проходимости, которая строится с использованием плоского LIDAR [1, 2]. Этот подход хорошо зарекомендовал себя при передвижении по достаточно ровной поверхности со статическими и динамическими препятствиями, представленными на высоте, на которой их может определить лазерный луч. Примерами устройств на основе такого решения являются хорошо известные роботы-пылесосы [3] или роботы-газонокосилки [4], успешно осуществляющие перемещение в ограниченной области пространства.

Существуют также алгоритмы интерпретирующей навигации [5], которые основываются на использовании не метрических координат, а некоторой карты ориентиров, по которой принимается решение о местонахождении робота и требуемых действиях для того, чтобы перейти в целевую область пространства. В целом этот подход эффективен, однако, в зависимости от реализации, задает не всегда выполнимые требования к карте ориентиров.

Известны методы, основанные на использовании последовательности ключевых кадров (КК), например, v-SLAM, о чем будет более подробно сказано ниже. В данной работе предлагается рассмотреть решение задач локализации и навигации в когнитивной карте ключевых кадров. В общем случае под когнитивной картой понимается некоторый граф, соединяющий переходами области, в которых состав наблюдаемых ориентиров эквивалентен (области информационной эквивалентности, ИЭ). Каждая область ИЭ характеризуется последовательностью уникальных видимых ориентиров. Качество локализации достигается за счет наличия достаточного количества ориентиров с тем, чтобы области ИЭ были малы.

В данной работе под когнитивной картой понимается заранее построенная при прохождении известного маршрута последовательность ключевых кадров, каждый из которых описывается набором неуникальных видимых ориентиров из заданного списка классов. В общем случае карта представляет собой линейный или разветвленный граф, связывающий ключевые кадры. В работе рассматривается элементарный вариант последовательной фиксации таких кадров при преодолении некоторого маршрута (линейный граф).

Под ключевым кадром в работе понимается кадр, полученный при составлении карты, а текущим кадром будем называть кадр, который фиксируется при повторном прохождении маршрута в текущий момент времени. Под задачей локализации в когнитивной карте здесь понимается поиск ключевого кадра, в котором набор и положение ориентиров наилучшим образом соответствуют текущему кадру. Такой КК будем называть целевым кадром. Под навигацией в когнитивной карте будем понимать проверку параметров преобразования текущего кадра к целевому: приблизить-отдалить, сдвинуть влево-вправо.

Для построения когнитивной карты предлагается использовать последовательную фиксацию кадров с фронтальной камеры робота. Получаемые изображения преобразуются в спайковые представления [6] с использованием классических и нейросетевых методов обнаружения и сопровождения объектов, как описано в [7]. Как было показано в [8], такое преобразование сокращает размерность признаков. Принципиально далее возможно аналитическое или численное решение вышеописанных задач локализации и навигации по аналогии с [9]. В данной работе мы провели проверку возможности их решения с использованием энергоэффективной технологии использования элементарных нейроморфных информационно-управляющих элементов (НИУЭ), описанных в [8, 10].

Существующие решения. При решении задачи навигации с использованием камеры классическим подходом является визуальный SLAM (visual SLAM, vSLAM) [9, 11]. Различные методы vSLAM так или иначе выполняют обнаружение точек резкого изменения яркости на кадре (визуальных особенностей) и стереосопоставление для двух и более различных кадров, определяя положение этих точек и камеры в обобщенной системе координат. При навигации используется двухшаговый подход, когда сначала выполняется поиск ближайшего ключевого кадра, а затем определение положения камеры относительно ближайшего ключевого кадра. Задача точного определения положения камеры в данной работе не рассматривается, поскольку когнитивная карта не содержит количественных измерений, только качественную информацию о направлениях на объекты в КК.

В классических алгоритмах vSLAM (2010-е годы), например, [10, 12], при сопоставлении используется сжатие текущего кадра и ключевого кадра [11, 13], что порождает, в частности, грубые ошибки при ложном сопоставлении. К достоинствам данного подхода можно отнести его простоту и небольшие требования к вычислительным ресурсам. Схожий подход использовался в более поздних алгоритмах, например, ORB-SLAM [12–15], где были попытки улучшить работу метода за счет использования более качественных дескрипторов [14, 16]. В работе LSD-SLAM [15–18], рассматривался подход на основе плотного (dense) сопоставления ключевых кадров, но и тот и другой подход очень зависимы от качества определения ориентиров и вообще качества получаемых кадров.

Некоторые методы используют также стереокамеру или RGB-D камеру, чтобы дополнять карту также некоторой метрической информацией, есть попытки построения плотной карты при монокулярном или стереосопоставлении. В силу своих особенностей данные методы являются чувствительными к качеству изображения, получаемого с камеры, к точности определения положения визуальных особенностей и качеству этих особенностей.

Известны также подходы, когда ключевые кадры дополняются ориентирами с некоторыми дескрипторами или даже формируются с их использованием. Поиск определенных зон заметности в качестве естественных ориентиров [17, 19], их сопровождение [18, 20] и ориентация на точки именно из них может существенно улучшать качество работы описанных выше vSLAM методов. Обнаружение и сопровождение искусственных визуальных ориентиров в качестве устойчивых признаков [19, 21] может позволить решить в том числе задачу определения пространственного положения, если с высокой точностью известны их пространственные координаты и ориентиров достаточное количество. Также задача определения положения может быть решена геометрически с разной степенью обусловленности если видимы три и более ориентиров [20, 22], или с помощью расширенного фильтра Калмана [21, 23], если известны закон движения, данные одометра и азимуты линий визирования на ориентиры с некоторой историей. К достоинствам перечисленных методов стоит отнести достаточность перечисленных элементов для определения положения и ориентации мобильного робота. В качестве недостатков необходимо отметить высокие требования к вычислительным ресурсам и необходимость знать положения ориентиров в некоторой заранее определенной системе координат.

Чтобы уйти от требования к наличию уникального идентификатора и координат для каждого объекта можно осуществить переход к более простому спайковому представлению кадра [7]. Для преобразования и сопоставления кадров могут быть использованы различные подходы, включая как аналитические способы, так и прямое вычисление дистанции между спайками. В данной работе были использованы рассмотренные в работе [8, 10] нейроморфные информационно-управляющие элементы, основанные на биоморфной сегментной спайковой модели нейрона [22, 24], отличающейся высокой модульностью и интерпретируемостью и в будущем предполагающей эффективную аппаратную реализацию [23, 25]. Совокупность (сеть) из нескольких связанных между собой НИУЭ позволяет как принять решение о том, какой из кадров карты наилучшим образом соответствует текущему, и в каком направлении сдвинута камера в целевом кадре относительно текущего при условии, что смещение небольшое.

Для обнаружения и сопровождения объектов в процессе исследования местности и сбора данных можно использовать фундаментальные нейронные сети для универсальной сегментации и сопровождения областей SAM [24, 26] и DeAOT [25, 27]. Для определения классов обнаруженных областей применимы нейросетевые классификаторы, например, ResNet [26, 28] или ConvNext [27, 29]. Ранее также рассматривался подход к классификации с использованием комбинации сиамской сверточной и сегментной спайковой сетей [28, 30]. Имея собранные данные, можно обучить нейросетевой детектор, например, Faster R-CNN [29, 31], Mask R-CNN [30, 32]. В случае, когда требуется высокая производительность или перенос на бортовой вычислитель, имеет смысл для распознавания использовать модели семейства YOLO [31, 33], [32, 34], RetinaNet [33, 35] или CenterNet [34, 36].

Механизм построения карты ключевых кадров. Сначала с помощью робота с установленной камерой, которая в будущем будет использоваться при навигации, выполняется запись видеороликов при произвольном движении робота в районе траектории по

которой в будущем планируется движение. Далее, каждый из роликов размечается комбинацией сетей SAM [24, 26] и DeAOT [25, 27]. После этого полученная разметка очищается вручную таким образом, чтобы оставить только те сегменты, которые относятся к объектам, локализированным в пространстве. К примеру, сегменты классов «пол», «потолок», «небо» занимают в кадре значительную площадь и почти не меняют свое положение на изображении при повороте и перемещении камеры и поэтому мало полезны для навигации. Напротив, объекты в помещении такие как «стул», «стол», «шкаф», «компьютер», «монитор» и т.п. не очень велики, хорошо локализованы в трехмерном пространстве помещения и занимают относительно небольшую часть площади кадра, поэтому их координаты на изображении могут использоваться при локализации и навигации.

Размеченные данные могут быть использованы различным способом для формирования когнитивной карты ключевых кадров. Ранее рассматривались подходы к использованию пространства представлений и распознаванию объектов на основе комбинации сиамской сверточной и сегментной спайковой нейронной сетей [7], что позволяет использовать подход на основе обучения без учителя, когда известно только то, что пары изображений относятся к одному и тому же объекту, а класс при обучении не задан.

Кроме того, если состав классов объектов и варианты внешнего вида заранее определены, то хорошим вариантом является использование вычислительно эффективных нейронных сетей для обнаружения и распознавания объектов. Наиболее известные методы для обнаружения объектов – семейство нейронных сетей R-CNN [29, 31], однопроходные методы на основе построения сетки и перечня допустимых габаритов объектов (SSD, YOLO различных версий [31, 33], [32, 34]), точечные методы оценки (RetinaNet [33, 35], CenterNet [34, 36]). При необходимости в использовании эффективного метода распознавания объектов или в переносе распознавания на непосредственно бортовой вычислитель на основе встраиваемого вычислителя с TPU лучшим решением является использование одной из версий YOLO.

С использованием одного из этих подходов выполняется построение когнитивной карты ключевых кадров. Кадры сохраняются при продольном или угловом смещении камеры на заданную величину. При формировании карты робот с камерой проходит по траектории, которую в будущем требуется воспроизвести. Граф из ключевых кадров формируется последовательно при прохождении траектории. Преобразование изображений в спайковые представления – процесс давно известный, и имеющий некоторые стандартные решения, например, [6, 35, 37]. Здесь для каждого из кадров формируется спайковый образ, в котором задержки напрямую соответствуют горизонтальным координатам объектов, которые близко соответствуют направлениям на объекты относительно оптической оси камеры. Пример спайкового образа одного из кадров представлен на рис. 1.

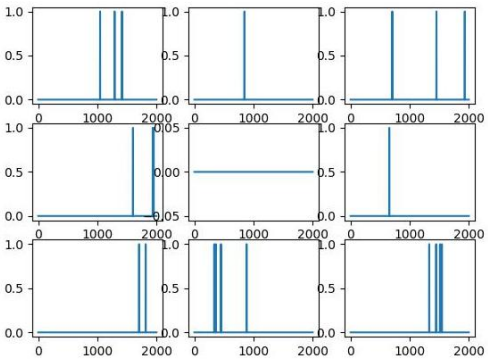


Рис. 1. Спайковый образ ключевого кадра

Алгоритмы локализации и навигации в когнитивной карте ключевых кадров. Для того, чтобы выполнить локализацию текущего кадра в карте необходимо найти ключевой кадр, который соответствует текущему наилучшим образом. Для сопоставления

спайковых представлений необходимо использовать группу из правильно настроенных НИУЭ [8, 10] для сопоставления последовательностей. Необходимо подать на возбуждающие входы элементов спайки образа ключевого кадра, а на тормозящий вход спайки текущего кадра (см. схему на рис. 2), и, если спайки в последовательностях достаточно близки, спайки на тормозящих входах подавят возбуждение и срабатывания не произойдет, как показано для первых двух пар спайков на рис. 3.

Сравнение последовательностей выполняется попарно для каждого из классов спайкового образа. В конце объединяются срабатывания для всех классов на элементарном НИУЭ типа «ИЛИ» и суммируются на счетчике для каждого из ключевых кадров карты. Кадр с наименьшим числом срабатываний (т.е. отличий) признается за текущее положение в карте. Если для всех кадров число срабатываний слишком велико, карта с большой долей вероятности не соответствует месту, в котором робот с камерой находится в данный момент.

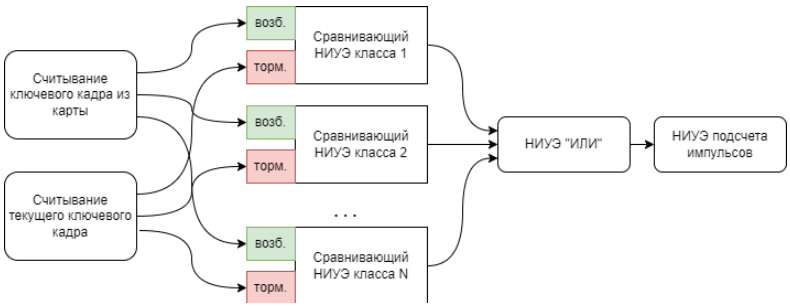


Рис. 2. Принцип сравнения кадров с использованием НИУЭ

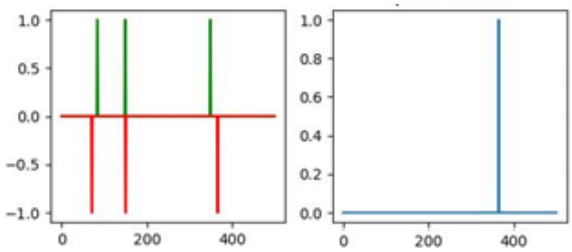


Рис. 3. Пример взаимного гашения импульсов

Кроме задачи локализации, если известны спайковые картины для текущего ключевого кадра и несколько отличающегося от него целевого кадра с помощью НИУЭ может быть решена задача навигации (определение направления смещения). В качестве целевого обычно выбирается следующий ключевой кадр от положения в карте. Для определения того, как именно смещена камера в целевом кадре относительно текущего используются специальные искажающие НИУЭ, а также показанный выше механизм сопоставления ключевых кадров.

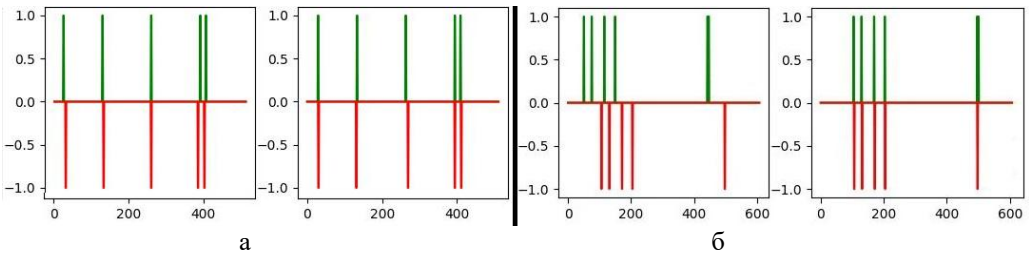


Рис. 4.. Пример смещения спайков последовательностей (а – вперед, б – вправо)

Когда целевой кадр сдвинут относительно текущего вперед или назад, объекты на изображении и соответствующие им спайки сдвинуты в стороны относительно середины (см. рис. 4,а, слева). Тогда перед сопоставлением последовательностей текущего и целевого кадра необходимо их исказить с учетом задержки D_1. Величина задержки зависит от дистанции смещения. Пусть продолжительность обоих последовательностей равна T. Сначала надо добавить задержку D_1 для целевого кадра (зеленые спайки). Затем сдвинуть правую часть ($t \geq T/2$) текущего кадра (красные спайки) на две величины задержки D_1. Таким образом проверяется, совпадут ли спайковые образы, если текущий кадр сместить вперед на некоторую дистанцию (рис. 4,а, справа). Для движения назад все аналогично, но целевой и текущий кадры меняются местами.

Если целевой ключевой кадр повернут относительно текущего на некоторый угол, то все спайки на целевом кадре будут сдвинуты относительно спайков на текущем на некоторую величину. Если целевой кадр повернут вправо, его спайки придут на вход раньше (рис. 4,б, слева). Для того, чтобы проверить, будут ли совпадать последовательности, если повернуть текущий кадр до целевого, необходимо добавить задержку D_2 для целевой последовательности, тогда картина примет вид как на рис. 4,б, справа. Разные величины D_2 соответствуют повороту на разный угол. При повороте влево аналогичная задержка добавляется для последовательности текущего кадра.

Для всех направлений необходимо исследовать несколько величин задержек D_1 и D_2, плюс их отсутствие для определения достижения целевого кадра. Общая схема показана на рис. 5. Выбирая вариант с минимальным количеством откликов, блок принятия решений может определить, в каком направлении относительно текущего смещен целевой кадр.

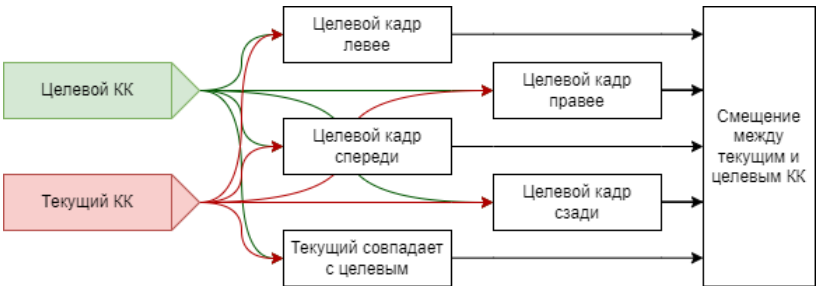


Рис. 5. Схема определения смещения между текущим и целевым КК

Описание эмулятора карты для исследования алгоритмов. Для проведения экспериментов по локализации и навигации в когнитивной карте ключевых кадров были разработаны инструменты для создания плана помещения (вид сверху) и эмуляции формирования карты ключевых кадров по этому плану, локализации и навигации в ней. Оба инструмента разработаны с использованием библиотеки для обработки изображений OpenCV на языке Python.

Инструмент для создания плана позволяет заполнять заданными цветами квадратные области с шагом в 10 см. Каждому цвету (в формате RGB) соответствует один класс объектов, черный соответствует отсутствию объектов. Размер карты, шаг, набор и цвета классов задаются как параметры. В результате получается план, информацию о положении объектов в котором можно получать посредством операций с цветами.

Для симуляции перемещения робота и построения карты был разработан программный эмулятор. Расположение каждого объекта определяется расположением центра масс области, окрашенной на плане соответствующим цветом, форма определяется формой области с точностью до шага ячейки. Робот эмулируется окружностью с допустимым радиусом столкновения и известным направлением. Камера эмулируется заданным углом обзора (в каких пределах по углу относительно направления движения робота камера видит объект) и радиусом восприятия (на каком расстоянии от центра робота видны объ-

екты). Перекрытия объектов друг другом для простоты не учитываются. Задержка спайков в спайковом образе прямо пропорциональна углу направления на объект в створе поля зрения камеры относительно левой его границы (угол и смещение спайка растут по часовой стрелке). В режиме построения когнитивной карты ключевых кадров текущий спайковый образ записывается в карту в качестве нового ключевого кадра, когда угловое или продольное смещение относительно предыдущего превысит заданное значение.

Экспериментальное исследование локализации. В рамках экспериментов по оценке качества работы алгоритма локализации было выполнено попарное сопоставление полученных карт для сформированных наборов данных. Для каждой из пар карт оценивалось число правильно и ошибочно локализованных кадров из первой последовательности во вторую и наоборот.

Для сопоставляемого ключевого кадра выполняется сравнение со всеми ключевыми кадрами карты. Подсчитывается количество спайков. Кадр с минимальным количеством откликов (или один из нескольких кадров, если два и более имеют одинаковое наименьшее число откликов) считается соответствующим сопоставляемому если число откликов меньше установленного порога. Успешность сопоставления определяется углом и дистанцией между текущим кадром и найденным соответствием менее установленного порога. Точность сопоставления – это отношение числа успешно сопоставленных кадров исследуемой последовательности к общему числу. Результаты для 3 пар последовательностей и 6 экспериментов по сопоставлению представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментов по локализации

Эксперимент	Правильно	Ошибочно	Точность, %
Левый 1 –> Левый 2	65	4	94
Левый 2 –> Левый 1	67	1	98
Правый 1 –> Правый 2	63	3	95
Правый 2 –> Правый 1	65	2	97
Круги 1 –> Круги 2	80	28	74
Круги 2 –> Круги 1	76	32	70

Полученное по результатам эксперимента качество сопоставления для прямолинейного и кругового движения можно признать удовлетворительным. В рамках исследования алгоритм был поставлен в принципиально более сложные условия, чем те, которые будут в реальной работе, поэтому на практике качество сопоставления будет выше.

Экспериментальное исследование навигации. Оценка качества работы предложенного подхода к навигации (т.е. определению направления смещения целевого ключевого кадра относительно текущего) выполнялась следующим образом. Каждая из 6 полученных карт представляет собой последовательность из N ключевых кадров с известным направлением движения. Для каждой из последовательностей сравнивались попарно соседние кадры (т.е. n и $n+1$ для $n \in (0, N-1)$) с использованием вышеописанного подхода. Для каждой пары по минимальному числу откликов определялось выбранное направление смещения и прибавлялось к значению в соответствующей графе.

Показатель точности соответствует проценту пар кадров, которые были распознаны правильно. Количество пар, целевые значения и точности представлены в табл. 2. Здесь слева показаны идентификаторы последовательностей, где «Л-П» и «П-Л» – карты ключевых кадров, в процессе получения которых робот в симуляции двигался прямолинейно вперед, слева направо или справа налево на плане, «Пов.» (поворот) – робот между кадрами совершал вращательное движение.

По результатам исследования можно утверждать, что разработанный алгоритм навигации, определения направления смещения между текущим и целевым ключевым кадром продемонстрировал высокое качество сопоставления для всех рассмотренных направлений.

Таблица 2

Результаты экспериментов по навигации

Послед.	Вперед	Назад	Влево	Вправо	Цель	Точность, %
Л-П 1	65	0	2	1	Вперед	95,59
Л-П 2	63	1	0	3	Вперед	94,03
П-Л 1	63	2	0	0	Вперед	96,92
П-Л 2	63	0	1	1	Вперед	96,92
Пов. 1	2	1	1	103	Вправо	96,26
Пов. 2	1	2	2	102	Вправо	95,33

Заключение. В рамках работы были рассмотрены подходы к локализации и навигации в когнитивной карте ключевых кадров с использованием спайковых представлений, построенных по данным изображений, получаемых с камеры. Описан подход к сбору данных и построению когнитивной карты ключевых кадров для работы в новой, ранее не изученной обстановке, приведено описание нескольких вариантов существующих подходов, которые могут быть применены для решения этой задачи.

Предложены подходы для локализации и навигации в когнитивной карте ключевых кадров с использованием групп известных нейроморфных информационно-управляющих элементов для преобразования и сравнения спайковых представлений кадров, построенных основе сегментного спайкового нейрона модели CSNM.

Разработан эмулятор передвижения робота на двумерном плане помещения с заданным набором объектов, соответствующим положению объектов в некотором реальном помещении. С использованием эмулятора собраны наборы данных, на базе которых проведена оценка качества локализации и навигации.

Алгоритм локализации показал очень высокое качество от 94 до 98% в случае решения задачи при прямолинейном движении (основной ожидаемый режим перемещения в процессе патрулирования) и до 74 % при локализации в карте с разными положениями камеры при ее вращении. Сравнительно низкий результат во втором случае объясняется тем, что алгоритм был поставлен в заранее невыгодные условия, которые не должны возникать при плановом использовании.

Алгоритм навигации показал качество от 94 до 97 % при прямолинейном движении и до 96 % при повороте. В целом, полученные показатели качества можно считать достаточно высокими, а разработанный алгоритм – предварительно пригодным для решения задачи навигации в карте ключевых кадров.

В дальнейшем предполагается продолжить исследование разработанных алгоритмов на видеопоследовательностях, полученных с реальной камеры. В частности, для построения образов ключевых кадров требуется выполнить исследование нейронных сетей семейства YOLO, R-CNN, RetinaNet, CenterNet в задаче обнаружения и распознавания заданного набора объектов. В перспективе также планируется рассмотреть вопрос переноса алгоритмов распознавания объектов на встраиваемые вычислители, а алгоритмов локализации и навигации на ПЛИС и/или аналоговые интегральные схемы.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России «Исследование методов самоорганизации и семантического взаимодействия в гибридных группах робототехнических агентов повышенной автономности»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Fox D., Burgard W., Thrun S.* The dynamic window approach to collision avoidance // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 1997. – Vol. 4, No. 1. – P. 23-33.
2. *Brock O., Khatib O.* High-speed navigation using the global dynamic window approach // Proceedings 1999 ieee international conference on robotics and automation (Cat. No. 99CH36288C). – IEEE, 1999. – Vol. 1. – P. 341-346.
3. *Pan S., Xie Z., Jiang Y.* Sweeping robot based on laser SLAM // Procedia Computer Science. – 2022. – Vol. 199. – P. 1205-1212.
4. *Hicks II R.W., Hall E.L.* Survey of robot lawn mowers // Intelligent Robots and Computer Vision XIX: Algorithms, Techniques, and Active Vision. – SPIE, 2000. – Vol. 4197. – P. 262-269.

5. *Кирильченко А.А., Платонов А.К., Соколов С.М.* Теоретические аспекты организации интерпретирующей навигации мобильного робота // Препринт Ин-та прикл. матем. им. МВ Келдыша РАН. – 2002. – №. 5. – С. 40.
6. *Orchard G. et al.* Converting static image datasets to spiking neuromorphic datasets using saccades // Frontiers in neuroscience. – 2015. – Vol. 9. – P. 437.
7. *Fomin I., Korsakov A., Arkhipov A.* Comparison of Key Frames of Video Sequences Using the Izhikevich Spiking Neuron // 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – IEEE, 2023. – P. 594-598.
8. *Иванова В.В., Беркман Д.А., Корсаков А.М.* Метод уменьшения размерности пространства признаков при решении задачи классификации // Перспективные системы и задачи управления. – 2023. – С. 591-596.
9. *Корсаков А.М., Степанов Д.Н., Смирнова Е.Ю.* Алгоритм определения ориентации транспортного средства на перекрестке по данным системы технического зрения // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника - 2016. – 2016. – С. 396-399.
10. *Иванова В.В., Демчева А.А., Корсаков А.М.* Нейроморфный механизм управления заданием по результатам анализа ситуации // Экстремальная робототехника. – 2024. – Т. 35, № 1. – С. 308-3015.
11. *Taketomi T., Uchiyama H., Ikeda S.* Visual SLAM algorithms: A survey from 2010 to 2016 // IPSJ transactions on computer vision and applications. – 2017. – Vol. 9. – P. 1-11.
12. *Davison A.J. et al.* MonoSLAM: Real-time single camera SLAM // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2007. – Vol. 29, No. 6. – P. 1052-1067.
13. *Klein G., Murray D.* Parallel tracking and mapping for small AR workspaces // 2007 6th IEEE and ACM international symposium on mixed and augmented reality. – IEEE, 2007. – P. 225-234.
14. *Mur-Artal R., Montiel J.M.M., Tardos J.D.* ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system // IEEE transactions on robotics. – 2015. – Vol. 31, No. 5. – P. 1147-1163.
15. *Mur-Artal R., Tardós J.D.* Orb-slam2: An open-source slam system for monocular, stereo, and rgb-d cameras // IEEE transactions on robotics. – 2017. – Vol. 33, No. 5. – P. 1255-1262.
16. *Rublee E. et al.* ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // 2011 International conference on computer vision. – Ieee, 2011. – P. 2564-2571.
17. *Engel J., Schöps T., Cremers D.* LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM // European conference on computer vision. – Cham: Springer International Publishing, 2014. – P. 834-849.
18. *Engel J., Stückler J., Cremers D.* Large-scale direct SLAM with stereo cameras // 2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). – IEEE, 2015. – P. 1935-1942.
19. *Smirnova E., Stepanov D., Goryunov V.* A technique of natural visual landmarks detection and description for mobile robot cognitive navigation // Annals of 26th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM. – 2015.
20. *Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J.* Tracking-learning-detection // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2011. – Vol. 34, No. 7. – P. 1409-1422.
21. *Бахшиев А.В., Корбан П.А., Кирпань Н.А*. Программный комплекс определения пространственной ориентации объектов по телевизионному изображению в задаче космической стыковки // Extreme Robotics. – 2013. – Т. 1, №. 1. – С. 288-293.
22. *Korsakov A.M. et al.* Determination of an Unmanned Mobile Object Orientation by Natural Landmarks // AIST (Supplement). – 2016. – P. 91-101.
23. *Кирпань Н.А., Степанов Д.Н.* Программа моделирования сцены с реперными маркерами и исследования методов определения положения объектов. – 2016 (№ рег. св. 2016612470).
24. *Bakhshiev A., Demcheva A., Stankevich L.* CSNM: the compartmental spiking neuron model for developing neuromorphic information processing systems // Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research V: Selected Papers from the XXIII International Conference on Neuroinformatics, October 18-22, 2021, Moscow, Russia. – Springer International Publishing, 2022. – P. 327-333.
25. *Boiko A., Bakhshiev A., Korsakov A.* The Hardware Implementation of the Compartmental Spiking Neuron Model (CSNM) Based on Single Supply Operational Amplifiers // International Conference on Neuroinformatics. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – P. 48-57.
26. *Kirillov A. et al.* Segment anything // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2023. – P. 4015-4026.
27. *Yang Z., Yang Y.* Decoupling features in hierarchical propagation for video object segmentation // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2022. – Vol. 35. – P. 36324-36336.
28. *He K. et al.* Deep residual learning for image recognition // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2016. – P. 770-778.
29. *Liu Z. et al.* A convnet for the 2020s // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2022. – P. 11976-11986.

30. *Fomin I. et al.* Investigation of a Spike Segment Neuron in the Offline Multi-Object Tracking Task with Embeddings Constructed by a Convolutional Network // International Conference on Neuroinformatics. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. – P. 346-354.
31. *Ren S. et al.* Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2016. – Vol. 39, No. 6. – P. 1137-1149.
32. *He K. et al.* Mask r-cnn // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2017. – P. 2961-2969.
33. *Varghese R., Sambath M.* YOLOv8: A Novel Object Detection Algorithm with En-hanced Performance and Robustness // 2024 International Conference on Advances in Data Engineering and Intelligent Computing Systems (ADICS). – IEEE, 2024. – P. 1-6.
34. *Wang A. et al.* Yolov10: Real-time end-to-end object detection // arXiv preprint arXiv:2405.14458. – 2024.
35. *Alhasanat M.N. et al.* RetinaNet-based Approach for Object Detection and Distance Estimation in an Image // International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP). – 2021. – Vol. 11, No. 1. – P. 1-9.
36. *Duan K. et al.* CenterNet++ for object detection // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2023.
37. *Chandarana P., Ou J., Zand R.* An adaptive sampling and edge detection approach for encoding static images for spiking neural networks // 2021 12th International Green and Sustainable Computing Conference (IGSC). – IEEE, 2021. – P. 1-8.

REFERENCES

1. *Fox D., Burgard W., Thrun S.* The dynamic window approach to collision avoidance, *IEEE Robotics & Automation Magazine,* 1997, Vol. 4, No. 1, pp. 23-33.
2. *Brock O., Khatib O.* High-speed navigation using the global dynamic window approach, *Proceedings 1999 ieee international conference on robotics and automation (Cat. No. 99CH36288C)*. IEEE, 1999, Vol. 1, pp. 341-346.
3. *Pan S., Xie Z., Jiang Y.* Sweeping robot based on laser SLAM, *Procedia Computer Science,* 2022, Vol. 199, pp. 1205-1212.
4. *Hicks II R.W., Hall E.L.* Survey of robot lawn mowers, *Intelligent Robots and Computer Vision XIX: Algorithms, Techniques, and Active Vision*. SPIE, 2000, Vol. 4197, pp. 262-269.
5. *Kiril'chenko A.A., Platonov A.K., Sokolov S.M.* Teoreticheskie aspekty organizatsii interpretiruyushchey navigatsii mobil'nogo robota [Theoretical Aspects of mobile robot interpreting navigation], *Preprint In-ta prikl. matem. im. MV Keldysha RAN* [Preprint of M.V. Keldysch RSA institute of applied math.], 2002, No. 5, pp. 40.
6. *Orchard G. et al.* Converting static image datasets to spiking neuromorphic datasets using saccades, *Frontiers in neuroscience,* 2015, Vol. 9, pp. 437.
7. *Fomin I., Korsakov A., Arkhipov A.* Comparison of Key Frames of Video Sequences Using the Izhikevich Spiking Neuron, *2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. IEEE, 2023, pp. 594-598.
8. *Ivanova V.V., Berkman D.A., Korsakov A.M.* Metod umen'sheniya razmernosti prostranstva priznakov pri reshenii zadachi klassifikatsii [A method for reducing the dimension of the feature space when solving a classification problem], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya* [Perspective systems and tasks of control], 2023, pp. 591-596.
9. *Korsakov A.M., Stepanov D.N., Smirnova E.Yu.* Algoritm opredeleniya orientatsii transportnogo sredstva na perekrestke po dannym sistemy tekhnicheskogo zreniya [An algorithm for determining the orientation of a vehicle at an intersection based on data from the vision system], *Intellektual'nye sistemy, upravlenie i mekhatronika – 2016* [Intellectual systems, control and mechatronics-2016], 2016, pp. 396-399.
10. *Ivanova V.V., Demcheva A.A., Korsakov A.M.* Neyromorfnyy mekhanizm upravleniya zadaniem po rezul'tatam analiza situatsii [Neuromorphic mechanism of task control using situation analysis], *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extreme robotics], 2024, Vol. 35, No. 1, pp. 308-3015.
11. *Taketomi T., Uchiyama H., Ikeda S.* Visual SLAM algorithms: A survey from 2010 to 2016, *IPSJ transactions on computer vision and applications,* 2017, Vol. 9, pp. 1-11.
12. *Davison A.J. et al.* MonoSLAM: Real-time single camera SLAM, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence,* 2007, Vol. 29, No. 6, pp. 1052-1067.
13. *Klein G., Murray D.* Parallel tracking and mapping for small AR workspaces, *2007 6th IEEE and ACM international symposium on mixed and augmented reality*. IEEE, 2007, pp. 225-234.
14. *Mur-Artal R., Montiel J.M.M., Tardos J.D.* ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system, *IEEE transactions on robotics,* 2015, Vol. 31, No. 5, pp. 1147-1163.
15. *Mur-Artal R., Tardós J.D.* Orb-slam2: An open-source slam system for monocular, stereo, and rgb-d cameras, *IEEE transactions on robotics,* 2017, Vol. 33, No. 5, pp. 1255-1262.
16. *Rublee E. et al.* ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF, *2011 International conference on computer vision*. Ieee, 2011, pp. 2564-2571.

17. *Engel J., Schöps T., Cremers D.* LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM, *European conference on computer vision*. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 834-849.
18. *Engel J., Stückler J., Cremers D.* Large-scale direct SLAM with stereo cameras, *2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*. IEEE, 2015, pp. 1935-1942.
19. *Smirnova E., Stepanov D., Goryunov V.* A technique of natural visual landmarks detection and description for mobile robot cognitive navigation, *Annals of 26th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM,* 2015.
20. *Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J.* Tracking-learning-detection, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence,* 2011, Vol. 34, No. 7, pp. 1409-1422.
21. *Bakhshiev A.V., Korban P.A., Kirpan' N.A.* Programmnyy kompleks opredeleniya prostranstvennoy orientatsii ob"ektov po televizionnomu izobrazheniyu v zadache kosmicheskoy stykovki [A software package for determining the spatial orientation of objects based on a television image in the task of space docking], *Extreme Robotics* [Extreme Robotics], 2013, Vol. 1, No. 1, pp. 288-293.
22. *Korsakov A.M. et al.* Determination of an Unmanned Mobile Object Orientation by Natural Landmarks, *AIST (Supplement),* 2016, pp. 91-101.
23. *Kirpan' N.A., Stepanov D.N.* Programma modelirovaniya stseny s repernymi markerami i issledovaniya metodov opredeleniya polozheniya ob"ektov [A program for modeling a scene with reference markers and researching methods for determining the position of objects], 2016 registration No. 2016612470).
24. *Bakhshiev A., Demcheva A., Stankevich L.* CSNM: the compartmental spiking neuron model for developing neuromorphic information processing systems, *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research V: Selected Papers from the XXIII International Conference on Neuroinformatics, October 18-22, 2021, Moscow, Russia*. Springer International Publishing, 2022, pp. 327-333.
25. *Boiko A., Bakhshiev A., Korsakov A.* The Hardware Implementation of the Compartmental Spiking Neuron Model (CSNM) Based on Single Supply Operational Amplifiers, *International Conference on Neuroinformatics*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 48-57.
26. *Kirillov A. et al.* Segment anything, *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision,* 2023, pp. 4015-4026.
27. *Yang Z., Yang Y.* Decoupling features in hierarchical propagation for video object segmentation, *Advances in Neural Information Processing Systems,* 2022, Vol. 35, pp. 36324-36336.
28. *He K. et al.* Deep residual learning for image recognition, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition,* 2016, pp. 770-778.
29. *Liu Z. et al.* A convnet for the 2020s, *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition,* 2022, pp. 11976-11986.
30. *Fomin I. et al.* Investigation of a Spike Segment Neuron in the Offline Multi-Object Tracking Task with Embeddings Constructed by a Convolutional Network, *International Conference on Neuroinformatics*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 346-354.
31. *Ren S. et al.* Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence,* 2016, Vol. 39, No. 6, pp. 1137-1149.
32. *He K. et al.* Mask r-cnn, *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision,* 2017, pp. 2961-2969.
33. *Varghese R., Sambath M.* YOLOv8: A Novel Object Detection Algorithm with En-hanced Performance and Robustness, *2024 International Conference on Advances in Data Engineering and Intelligent Computing Systems (ADICS)*. IEEE, 2024, pp. 1-6.
34. *Wang A. et al.* Yolov10: Real-time end-to-end object detection, *arXiv preprint arXiv:2405.14458,* 2024.
35. *Alhasanat M.N. et al.* RetinaNet-based Approach for Object Detection and Distance Estimation in an Image, *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP),* 2021, Vol. 11, No. 1, pp. 1-9.
36. *Duan K. et al.* CenterNet++ for object detection, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. – 2023.
37. *Chandarana P., Ou J., Zand R.* An adaptive sampling and edge detection approach for encoding static images for spiking neural networks, *2021 12th International Green and Sustainable Computing Conference (IGSC)*. IEEE, 2021, pp. 1-8.

Фомин Иван Сергеевич – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: i.fomin@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; научный сотрудник.

Матвеев Виктор Дмитриевич – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: v.matveev@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; инженер.

Архипов Андрей Евгениевич – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: a.arkhipov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; м.н.с.

Fomin Ivan Sergeevich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: i.fomin@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; researcher.

Matveev Victor Dmitrievich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: v.matveev@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; engineer.

Arkhipov Andrey Evgenievich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: a.arkhipov@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; junior researcher.

УДК 004.8 DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-284-297

С.С. Обаид, В.А. Погонин, И.Б. Кирина

ИНТЕГРАЦИЯ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛИ ВЛАГОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «УМНЫЙ САД»

Представлено исследование по разработке и интеграции рекуррентной нейронной сети (RNN) для повышения точности и отказоустойчивости модели влагопереноса в системе «Умный сад». Проблема контроля влажности почвы становится особенно актуальной в современных условиях сельского хозяйства и экологического мониторинга, где требуется высокая точность для управления водными ресурсами, прогнозирования урожайности и предотвращения засушливых периодов. Традиционные методы, такие как дистанционное зондирование и модели влагопереноса, имеют существенные ограничения: низкая точность, сложность вычислений, зависимость от точных данных сенсоров и сложность применения в реальных полевых условиях. Для решения этих проблем в исследовании предлагается использование RNN, способной эффективно обрабатывать временные ряды данных и прогнозировать влажность почвы даже при наличии неполных, неточных или искажённых входных данных. В качестве исходных данных использованы глобальный датасет влажности почвы GSSM и погодные данные платформы Meteostat, что позволило учесть климатические особенности регионов с разными типами почвы. Модель включает слой долговременной краткосрочной памяти (LSTM) и полносвязный слой для финального прогнозирования. Особое внимание уделено предобработке данных, включая расчёт среднедневных, среднемесячных и среднегодовых значений, а также коррекцию данных с учётом характеристик различных типов почв. Проведённое исследование показало, что разработанная модель RNN обладает высокой устойчивостью к сбоям в работе сенсоров, минимальной зависимостью от объёма входных данных и способностью адаптироваться к разным климатическим и почвенным условиям. Предлагаемое решение позволяет улучшить точность мониторинга влажности почвы в системе «Умный сад», оптимизировать использование водных ресурсов и повысить стабильность работы системы в условиях изменяющихся внешних факторов. Таким образом, интеграция RNN открывает новые возможности для развития сельского хозяйства и экологии, обеспечивая более эффективное управление водными ресурсами и повышение производительности агросистем.

Рекуррентная нейронная сеть; влагоперенос в почве; «Умный сад»; отказоустойчивость; прогнозирование.

S.S. Obaid, V.A. Pogonin, I.B. Kirina

INTEGRATION OF A RECURRENT NEURAL NETWORK TO INCREASE THE FAILURE TOLERANCE OF THE MOISTURE TRANSFER MODEL IN THE SMART GARDEN SYSTEM

The paper presents a study on the development and integration of a recurrent neural network (RNN) to improve the accuracy and fault tolerance of a moisture transfer model in a smart garden system. The problem of soil moisture control is becoming especially relevant in modern agricultural and environmental monitoring, where high accuracy is required to manage water resources, forecast crop yields and prevent drought periods. Traditional methods, such as remote sensing and moisture transfer models, have significant limitations: low accuracy, computational complexity, dependence on accurate sensor data and difficulty in applying in real field conditions. To solve these problems, the study proposes the use of RNN,

which is able to effectively process time series data and predict soil moisture even in the presence of incomplete, inaccurate or distorted input data. The global soil moisture dataset GSSM and weather data from the Meteostat platform were used as initial data, which made it possible to take into account the climatic features of regions with different soil types. The model includes a long short-term memory (LSTM) layer and a fully connected layer for the final forecast. Particular attention is paid to data preprocessing, including calculating average daily, average monthly and average annual values, as well as data correction taking into account the characteristics of different soil types. The study showed that the developed RNN model is highly resistant to sensor failures, has minimal dependence on the volume of input data and is able to adapt to different climatic and soil conditions. The proposed solution improves the accuracy of soil moisture monitoring in the Smart Garden system, optimizes the use of water resources and increases the stability of the system in the face of changing external factors. Thus, the integration of RNN opens up new opportunities for the development of agriculture and ecology, ensuring more efficient water resource management and increasing the productivity of agrosystems.

Recurrent neural network; soil moisture transfer; "Smart Garden"; fault tolerance; forecasting.

Введение. Актуальность разработки и применения систем мониторинга влажности почвы значительно возросла в условиях современных требований к сельскохозяйственным и экологическим исследованиям. Влажность почвы является важным фактором, влияющим на обмен веществ и энергии между почвой и атмосферой, а также на глобальную циркуляцию водяного пара, развитие экосистем и энергетические процессы [1]. В сельском хозяйстве контроль влажности почвы позволяет оценивать рост растений, прогнозировать урожайность и следить за засушливыми периодами.

Существующие методы оценки влажности почвы, как дистанционное зондирование, так и полевые наблюдения, ограничены в ресурсах и показывают недостаточную точность результатов. Микроволновые и оптические технологии дистанционного зондирования, которые применяются для мониторинга влажности на больших территориях, также имеют ограничения, связанные с низким пространственным разрешением и чувствительностью к внешним факторам. На основе моделей оценки влажности почвы создаются более сложные модели влагопереноса в почве.

В современных условиях садоводства система «Умный сад» становится всё более востребованной благодаря оптимизации использования ресурсов и увеличению урожайности. Одним из ключевых элементов системы является контроль влажности почвы, для чего широко применяются модели влагопереноса. Такие модели имеют ряд ограничений: сложность вычислений, зависимость от точных данных о параметрах почвы и низкая точность в полевых условиях.

При сбоях в работе датчиков или неточных показателях существующих моделей, критически важной становится задача повышения точности и устойчивости системы к отказам. Перспективное решение представляет применение методов глубокого обучения, в частности рекуррентных нейронных сетей (RNN), поскольку они способны предсказывать значения временных рядов с высокой точностью. В данном исследовании предложена интеграция RNN для достижения высокого уровня отказоустойчивости системы «Умный сад» и повышения точности модели влагопереноса, с целью эффективного преодоления недостатков применяемых существующих решений.

1. Постановка задачи. Цель исследования заключается в разработке и интеграции модели RNN для обеспечения отказоустойчивости системы «Умный сад» и повышения точности модели влагопереноса. В рамках исследования поставлены задачи анализа существующих моделей оценки влажности и влагопереноса в почве, выявления их недостатков, а также выбора и предобработки данных для обучения и тестирования модели. После чего, разработка архитектуры модели, её обучение и тестирование.

Основной задачей исследования является создание RNN, способной адаптироваться к неполным или неточным данным, обеспечивая высокую точность моделирования влагопереноса даже при отказе датчиков.

2. Материал и методы исследования. Модели влагопереноса в почве часто базируются на моделях оценки влажности, поскольку корректная оценка влажности верхних и корневых слоев почвы является ключевым компонентом для моделирования процессов инфильтрации, испарения и перемещения влаги. Модели оценки обеспечивают входные

данные, используемые в более сложных моделях для прогнозирования влагообмена в различных слоях почвы, что делает их неотъемлемой частью моделирования влагопереноса. Учитывая вышесказанное, важно сперва исследовать модели оценки влажности почвы, в частности модели зондирования влажности почвы.

2.1. Модели оценки влажности почвы. Множество исследований посвящено дистанционному зондированию влажности почвы [2], в рамках которых были разработаны четыре основных типа моделей: эмпирические, полуэмпирические, физические модели на основе математической статистики и модели с физическим смыслом. Эти модели глубоко изучены, и на их основе созданы различные продукты для мониторинга влажности почвы. С развитием компьютерных технологий и искусственного интеллекта быстро прогрессируют методы машинного обучения, такие как нейронные сети, которые показали хорошие результаты в оценке влажности почвы и привлекли большое внимание.

Эмпирическая модель оценки влажности почвы основывается на параметрах, таких как температура поверхности, коэффициент обратного рассеяния радара и оптические индексы (например, normalized vegetation index, NDVI). Микроволновые методы разделяются на активные и пассивные, где влажность почвы оценивается с помощью коэффициента обратного рассеяния, температуры яркости и содержания воды в растительности. Эти модели показывают высокую корреляцию между отражательной способностью почвы и её влажностью. Методы, основанные на инфракрасном излучении, часто используются, но их точность может снижаться из-за растительности. Для устранения влияния растительности были разработаны более сложные индексы, такие как NMDI (normalized multi-band drought index) и MPDI (modified perpendicular drought index). Современная модель OPTRAM (Optical Trapezoid Model) использует данные спутников Sentinel-2 и Landsat-8 для построения модели, что позволяет достигать высокой точности в оценке влажности почвы [3].

Полуэмпирические модели обрабатывают одновременно эмпирические и физические данные с целью снижения влияния растительности, а также шероховатости поверхности, и повышения точности оценки влажности почвы. Модели, подобные модели OH и Дюбуа, для оценки влажности почвы используют радарные данные, опираясь на взаимосвязь между шероховатостью поверхности, влажностью почвы и коэффициентами рассеяния [4, 5]. Для улучшения точности в областях с растительностью применяется модель водяного облака (water-cloud model), которая использует данные радаров, таких как Sentinel-1 [6]. Эта модель позволяет эффективно оценивать влажность почвы под покровом растительности. Кроме того, разработаны методы, объединяющие оптические и радарные данные, что позволяет ещё точнее оценивать влажность в сложных условиях, например, на сельскохозяйственных или лесных территориях.

Физические модели для оценки влажности почвы были впервые предложены в 1950-х годах. Наиболее распространённые из них включают метод малых возмущений (small perturbation method, SPM) [7], приближение Кирхгофа (Kirchhoff Approximation, KA) [8] и интегральную модель уравнений (integral equation model, IEM) [9]. IEM и её улучшенная версия AIEM (advanced integral equation model) являются наиболее популярными моделями для оценки влажности почвы. Эти модели используют уравнение переноса микроволнового излучения и учитывают шероховатость поверхности. Модель AIEM улучшает расчёт коэффициентов рассеяния и автокорреляционных функций, что повышает точность моделирования. Также были разработаны модели для исправления ошибок, связанных с растительностью и шероховатостью, что позволило значительно улучшить точность оценки влажности почвы. Модель Qp [10], основанная на данных спутников, позволяет устранить влияние шероховатости, а алгоритмы, такие как AMSR-E [11], используют методы наименьших квадратов для минимизации различий между наблюдаемыми и моделируемыми значениями температуры яркости. Эти физические модели применяются для глобального мониторинга влажности почвы с помощью спутников, таких как AMSR и FY-3.

Методы машинного обучения, такие как нейронные сети, случайные леса (random forest, RF), опорные векторные машины (support vector machine, SVM) и глубокое обучение, активно используются для оценки влажности почвы на основе данных дистанцион-

ного зондирования. Эти методы демонстрируют высокую точность в моделировании влажности почвы и позволяют избегать сложных процессов, связанных с учётом растительности и шероховатости поверхности. Например, метод улучшенной сверточной нейронной сети (Improved Convolutional Neural Network, ICNN) с использованием радарных и мультиспектральных данных [12] позволил достичь корреляции между оценками и измерениями влажности почвы до 0,934 и RMSE 0,0145. Другие исследования [13] показывают, что комбинация данных Sentinel-1 и нейронных сетей может дать RMSE до 0,045. В машинном обучении также используется 10-кратная перекрестная проверка для выбора лучших моделей, что помогает улучшить пространственное разрешение продуктов влажности почвы. Например, метод уменьшения масштаба данных AMSR-E с использованием случайного леса привел к получению данных с разрешением 1 км [14, 15].

Для дальнейшего развития моделей оценки влажности почвы необходимо объединение данных из различных источников, например таких как оптическое и радиолокационное зондирование, повышение пространственно-временного разрешения для точного мониторинга, особенно в корневой зоне, и продление временных рядов наблюдений для климатических исследований. Также требуется повышение точности и интерпретируемости моделей с минимальной зависимостью от дополнительных данных, что создает основу для аналогичных задач в моделях влагопереноса, которые сталкиваются с теми же проблемами точности, разрешения и интерпретируемости. Рассмотрим существующие модели влагопереноса в почве.

2.2. Модели влагопереноса в почве. Уравнение Ричардса описывает движение воды в ненасыщенных почвах и было предложено Лоренцо А. Ричардсом в 1931 году [16]. Оно основано на законе Дарси-Бекингема для течения в пористых средах при изменяющейся степени насыщенности. Уравнение представляет собой квазилинейное дифференциальное уравнение и решается при определенных начальных и граничных условиях (1):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (K(\theta)\nabla\Psi) + S. \quad (1)$$

где θ – влажность почвы (% объема воды),
t – время,
$K(\theta)$ – гидравлическая проводимость почвы,
Ψ – матричный потенциал,
S – сток или источник влаги в почве,
∇ – оператор набла (пространственный градиент).

Основные проблемы при решении включают сложные вычисления и зависимость от гидравлических параметров почвы, таких как водоудерживающая способность, насыщенность и гидравлическая проводимость. Существуют разные формы уравнения: основанная на давлении и на насыщенности, каждая из которых имеет свои вычислительные сложности. Численное решение уравнения Ричардса требует точной настройки параметров почвы и сложных вычислительных методов для обеспечения устойчивого и точного результата.

Модель Ван Генухтена-Муалема описывает зависимость матричного потенциала и водопроводимости от влажности почвы [17]. Уравнение удержания воды является основой уравнения, где влажность определяется насыщенной и остаточной влажностью, а также учитывает параметрами почвы полученные эмпирически (2):

$$\theta(\Psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1+(\alpha|\Psi|)^n]^m}, \quad (2)$$

где $\theta(\Psi)$ – влажность почвы (при матричном потенциале Ψ),
θ_r и θ_s – остаточная и насыщенная влажность почвы,
α, n и m – характеризующие почву эмпирические параметры,
$m = 1 - 1/n$, предполагая, что $n > 1$.

Гидравлическая проводимость рассчитывается по формуле Муалема (3):

$$K(\Psi) = K_s\sqrt{\theta(\Psi)}\left[1 - (1 - \theta(\Psi)^{\frac{1}{m}})^m\right]^2, \quad (3)$$

где K_s – насыщенная гидравлическая проводимость почвы.

Модель оценивает проводимость и водопоглощение ненасыщенных почв с высокой точностью, что значимо для управления водными ресурсами и ирригации. Однако применение данной модели требует полевых или лабораторных измерений для точного определения параметров. Важно также отметить, что модель может отражать поведение гетерогенных почв не в полной мере.

Модель Дарси-Бакингема, опираясь на потенциал влажности Бакингема и закон Дарси, описывает перемещение воды в ненасыщенных почвах [18] (4).

$$q = -K(\theta)\left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1\right), \quad (4)$$

где q – скорость водного потока в почве (м/с),

$K(\theta)$ – гидравлическая проводимость от функции влажности почвы θ,

Ψ – матричный потенциал (м),

z – вертикальная координата, направленная вверх,

$\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1$ – градиент общего потенциала воды (включая матричный потенциал и гравитационный компонент).

Прогнозирование движения воды через почву и прочие пористые среды, учитывая изменение насыщенности – основная задача данной модели. Модель широко применяется для решения вопросов водного хозяйства, дренажа и ирригации, поскольку помогает проанализировать движение водяных масс в почве и оценить потребность в поливе. Сложность точного определения матричного потенциала и параметров гидравлической проводимости – основная проблема модели. Также необходимо наличие точных данных и учет возможной неоднородности почвы для определения и введения граничных условий, что повышает уровень сложности моделирования и требует для получения корректных параметров проведения полевых или лабораторных испытаний.

Модель Грина-Ампта описывает процесс инфильтрации воды в почву, принимая допущение о наличии резкой границы влажности (фронт увлажнения) между насыщенной и ненасыщенной зонами почвы [19]. В основе этой модели лежит применение закона Дарси для описания скорости фильтрации воды через увлажненный слой почвы (5):

$$Z = K(t - t_p) + \left(\frac{\psi m}{K}\right) ln\left(\frac{Kt}{\psi m} + 1\right), \quad (5)$$

где

Z – глубина влажного фронта,

t – время,

t_p – время начала насыщения,

K – гидравлическая проводимость почвы,

ψm – потенциал матрицы почвы на границе влажной зоны.

Главным преимуществом модели является ее относительная простота и возможность использования для моделирования процессов инфильтрации на различных почвенных типах, особенно для задач, связанных с ирригацией, моделированием стока, а также при проектировании дренажных систем. Однако у модели есть и недостатки. Во-первых, она предполагает, что почва является однородной и ее свойства не изменяются с глубиной, что не всегда соответствует реальным условиям, особенно при наличии слоистых почв. Во-вторых, модель игнорирует влияние гравитации на более глубокие слои почвы, что может привести к погрешностям в расчетах для глубоких профилей. Наконец, модель не учитывает возможные вариации влажности почвы до начала инфильтрации, а также сложные процессы, связанные с капиллярными силами.

Модель Филиппа описывает процесс проникновения воды в почву, при котором скорость инфильтрации постепенно уменьшается со временем [20]. На начальном этапе инфильтрация происходит быстро за счёт сорбционных процессов (впитывания воды почвой), однако затем скорость замедляется и приближается к постоянному уровню (6):

$$I(t) = St^{-\frac{1}{2}} + At, \quad (6)$$

где Z – глубина влажного фронта,

I(t) – скорость инфильтрации в момент времени *t*;

S – сорбционная способность почвы (выражаемая константой);

A – константа скорости инфильтрации, которая достигается после определённого временного периода;

t – время.

Модель применяется для расчета водного баланса и описания процессов водопоглащения в гидрологии и агрономии, в особенности в условиях искусственного орошения или кратковременных осадков. При этом, в случае описания более сложных процессов влагопереноса, таких как влияние более глубоких слоев почвы и ее неоднородности, модель Филиппа представляется ограниченной, что поднимает вопрос использования для более точного прогнозирования дополнительных моделей. Несмотря на это, она полезна для прогнозирования инфильтрации в простых условиях и часто используется в исследованиях инфильтрации и управления водными ресурсами.

Фрактальные модели влагопереноса применяют самоподобие для описания сложной структуры почвы и процессов движения воды [21]. Они учитывают взаимодействие воды с пористыми структурами на разных масштабах, что позволяет моделировать такие процессы, как конденсация, испарение и адсорбция. Преимуществом фрактальных моделей есть высокая точность влагообмена, в особенности для неоднородных почв. При этом, высокая вычислительная сложность является недостатком, а также требование точных входных данных и необходимость наличия глубоких знаний в области фрактальной геометрии, что существенно ограничивает их использование на практике.

В результате анализа существующих моделей влагопереноса выявлены ключевые ограничения, такие как зависимость от точных данных сенсоров, сложность вычислений и недостаточная точность прогнозов в реальных полевых условиях. Эти факторы существенно снижают практическую применимость традиционных подходов и актуализируют задачу разработки и интеграции инновационных методов. Одним из перспективных решений является использование рекуррентных нейронных сетей (RNN), которые способны эффективно обрабатывать временные ряды данных и адаптироваться к неполным или неточным исходным данным.

Интеграция RNN в систему «Умный сад» может быть реализована в качестве дополнения к существующей модели влагопереноса. RNN может выполнять две основные функции:

1. Резервный источник данных. В случае отказа сенсоров, обеспечивающих показатели для модели влагопереноса, RNN будет использовать исторические данные и текущие климатические параметры для прогнозирования влажности почвы с высокой точностью. Это позволит поддерживать работоспособность системы в условиях ограниченности данных.
2. Динамическое уточнение прогнозов. Благодаря способности дообучения, RNN сможет регулярно обновлять свои параметры на основе новых данных влажности почвы. Это обеспечит адаптацию модели к текущим условиям, включая изменение климатических факторов или характеристик почвы, и повысит точность прогнозирования.

Дополнительно RNN может быть интегрирована с данными метеорологических платформ (например, Meteostat), чтобы учитывать такие параметры, как температура воздуха, осадки, скорость ветра и относительная влажность. Эти данные позволят модели более точно учитывать динамику процессов испарения и инфильтрации, улучшая результаты прогнозирования.

2.3. Формализация оценки отказоустойчивости. Для оценки отказоустойчивости, а также точности, используется среднеквадратическая ошибка (MSE) между истинными и прогнозируемыми значениями влажности почвы (7):

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (7)$$

где $\hat{y}_i$ – прогнозируемое значение влажности почвы;

y_i – истинное значение влажности почвы;

n – количество прогнозируемых точек.

Отказоустойчивость модели (FT) оценивается с учетом разницы допустимого значения MSE и фактического значения MSE (8):

$$FT = \frac{MSE_a - MSE_f}{MSE_a} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где MSE_a – допустимое значение MSE; MSE_f – фактическое значение MSE.

Таким образом показатель отказоустойчивости находиться в пределах от минус бесконечности до 100%. 100%-е значение отказоустойчивости означает, что фактическое значение MSE равно нулю, а допустимое значение MSE больше нуля – это случай максимально-возможной отказоустойчивости. Если допустимое и фактическое значение MSE равны, тогда отказоустойчивость будет равна 0% – система на грани выхода за предельно допустимое значение MSE. И, наконец, если фактическое значение MSE выше допустимого – значение отказоустойчивости будет отрицательным, что означает неспособность системы удерживаться в рамках допустимого порога MSE.

Последняя формула может также применяться для оценки точности прогнозирования влажности почвы. Стоит заметить, что допустимое пороговое значение MSE в ней задается пользователем.

2.4. Разработка и обучение RNN. Для обучения и тестирования модели RNN был выбран датасет The global seamless soil moisture dataset (GSSM) [22]. Данный выбор обусловлен его высокой временной разрешающей способностью, долгосрочным периодом измерений, а также глобальным покрытием, что позволяет получить региональные данные для различных климатических условий. Для обеспечения соответствия задачам исследования на данные наложены погодные измерения, предоставленные платформой Meteostat [23], для получения ежедневных данных.

Предобработка данных включала:

1. Вычисление ежемесячных средних значений влажности почвы на основе данных GSSM.
2. Интеграцию погодных данных, таких как температура воздуха, осадки, скорость ветра и относительная влажность, для расчёта испарения и динамики влажности почвы. Погодные данные (температура, осадки, скорость ветра, относительная влажность) для каждой точки местности извлекались из платформы Meteostat с почасовым разрешением. На основе этих данных рассчитывалась скорость испарения с использованием формулы, учитывающей температуру, влажность, скорость ветра и коэффициент испарения. Расчётное значение испарения вычиталось из предыдущего значения влажности почвы, скорректированного с учётом осадков и снегового покрова. Для регионов с отрицательной температурой учитывалась задержка влаги в виде снега. Итоговые значения влажности нормализовались относительно среднего значения за месяц, чтобы соответствовать реальным данным GSSM.
3. Корректировка рассчитанных значений влажности почвы в зависимости от преобладающего типа почвы в Москве и Растове-на-Дону соответственно. Значения влажности почвы умножались на коэффициент удержания влаги в зависимости от типа почвы для выбранных регионов.
4. Масштабирование данных влажности в диапазоне 0–1.

Для формирования входных данных в RNN использовались следующие признаки:

- Среднегодовое значение влажности.
- Среднемесячные значения влажности.
- Среднедневные значения влажности.
- Среднечасовые значения влажности.

Каждому значению влажности добавлялся показатель, представляющий обратную величину времени до момента измерения, что позволило сформировать двумерный массив входных данных для модели RNN. Исследование сосредоточено на регионах Москвы и Ростова-на-Дону, где проводились расчёты на основе данных GSSM и погодных данных Meteostat за период с 2012 по 2022 год.

Разделение данных производилось в пропорции 80% на тренировочную и 20% на тестовую выборки. Тренировочная выборка дополнительно разделялась на тренировочную и валидационную в соотношении 80% к 20%.

Разработанная и обученная модель RNN построена на архитектуре LSTM (Long Short-Term Memory). Она включает:

1. Входной слой.
2. LSTM-слой с 10 нейронами, возвращающий последовательность состояний.
3. Полносвязный слой Dense с одним нейроном для финального предсказания.

Стоит заметить, что изначально эксперименты проводились с большим количеством слоев и нейронов в слоях, однако это не дало существенного повышения точности получаемых результатов. Поэтому архитектура нейронной сети была оптимизирована для минимизации требований к вычислительным ресурсам при сохранении достаточной точности прогнозов влажности почвы.

В качестве функции потерь выбрана среднеквадратичная ошибка (MSE), а в качестве оптимизатора – Adam. Размер батча установлен на 32 для повышения эффективности работы модели. Обучение модели длилось 10 эпох с валидацией на 20% тренировочной выборки. На каждой эпохе сохранялась лучшая модель по минимальному значению MSE на валидационной выборке.

На рис. 1 представлены графики изменения MSE для валидационной и тренировочной выборок (данных) Москвы.

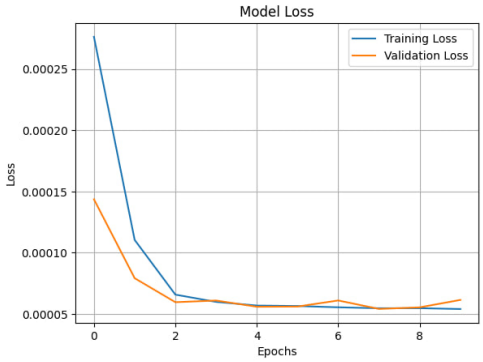


Рис. 1. Графики потерь (MSE) на тренировочной и валидационной выборках (Москва)

На рис. 2 представлены графики изменения MSE для валидационной и тренировочной выборок (данных) Ростова-на-Дону.

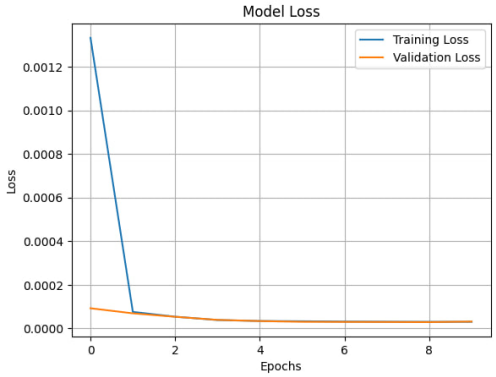


Рис. 2. Графики потерь (MSE) на тренировочной и валидационной выборках (Ростов-на-Дону)

По графикам функции потерь на данных Москвы и Ростова-на-Дону видно, что модель обучена успешно, переобучения не наблюдается.

Оценка модели на тестовой выборке показала удовлетворительное качество предсказаний, с приемлемым значением MSE. Предсказания модели коррелировали с истинными значениями, что подтверждается визуализацией результатов. Таким образом, разработанная модель RNN демонстрирует потенциал для прогнозирования временных рядов влажности почвы в различных климатических условиях.

3. Результаты исследования и их обсуждение. Разработанная модель RNN была протестирована на данных двух регионов: Москвы и Ростова-на-Дону, представленных разными типами почвы – глинистой и суглинистой. Для каждого региона проведён анализ точности модели, включая сравнение прогнозируемых и истинных значений, оценку ошибок и их распределения, а также исследование поведения модели при изменении входных данных.

В табл. 1 приведены значения среднеквадратичной ошибки (MSE) для тестовых выборок каждого региона и типа почвы.

Таблица 1

MSE на тестовых выборках для разных регионов (типов почвы)

Регион	Тип почвы	Ошибка MSE
Москва	Глинистая	5.04×10^{-5}
Ростов-на-Дону	Суглинистая	2.94×10^{-5}

Полученные значения MSE показывают, что модель RNN демонстрирует хорошую точность прогнозирования для обоих регионов. Однако, в Ростове-на-Дону ошибка MSE значительно ниже, чем в Москве, что может быть связано с более стабильными характеристиками суглинистой почвы по сравнению с глинистой. Для глинистой почвы характерны большие колебания уровня влажности, что усложняет её прогнозирование.

Для визуальной оценки точности прогнозирования показателей влажности почвы, из тестовой выборки были взяты 30 значений входных данных, которые были переданы на вход обученной модели нейросети, и затем полученные результаты сравнены с истинными значениями. Эти действия были выполнены для каждого региона соответственно.

Графики сравнения 30 прогнозируемых и истинных значений влажности почвы для Москвы представлен на рис. 3.

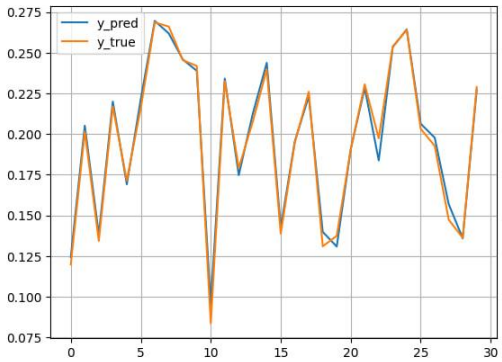


Рис. 3. Графики сравнения 30 прогнозируемых и истинных значений влажности почвы для Москвы

Графики сравнения 30 прогнозируемых и истинных значений влажности почвы для Ростова-на-Дону представлен на рис. 4.

Эти графики показывают высокую степень соответствия между прогнозируемыми значениями и фактическими данными, что указывает на хорошее качество модели. Отклонения прогнозируемых значений от истинных минимальны и несущественны.

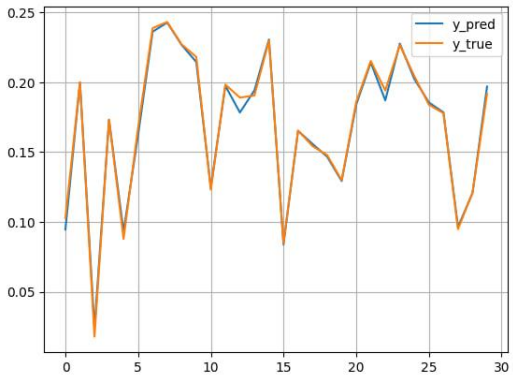


Рис. 4. Графики сравнения 30 прогнозируе-мых и истинных значений влажности почвы для Ростова-на-Дону

Для оценки распределения ошибок построены диаграммы размаха для каждого региона (рис. 5).

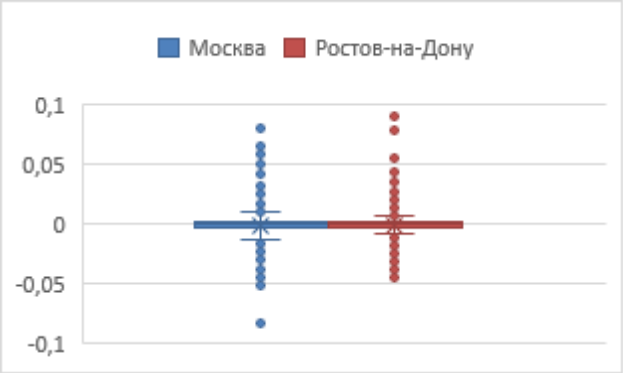


Рис. 5. Диаграмма размаха значений ошибок (разниц истинных и прогнозируемых показателей влажности)

Медианные значения для обоих регионов близки к нулю, что свидетельствует о низком систематическом смещении модели. Однако для Москвы наблюдаются чуть более крупные выбросы, что может быть связано с высокой гетерогенностью глинистой почвы. В Ростове-на-Дону выбросы тоже есть, но чуть меньше, что подтверждает стабильность модели для суглинистой почвы. Разброс значений ошибок в Москве больше, что свидетельствует о возможной необходимости дальнейшей оптимизации модели для работы с глинистой почвой.

Для проверки устойчивости модели была проведена дополнительная серия экспериментов с укороченными входными данными. Включались только данные за последний месяц и день, при этом остальные входные значения обнулялись. Несмотря на это, ошибка MSE практически не изменилась (отклонение менее 10^{-6}), что демонстрирует способность модели эффективно работать даже при ограниченном количестве данных. Результаты экспериментов с укороченными входными данными представлены в табл. 2.

Из результатов дополнительных экспериментов можно заключить, что больший период входных данных гарантирует более точные результаты. При этом даже в случае ограничения входных данных периодом в один день снижает точность не существенно, погрешность не превышает 10^{-5}.

Таблица 2

MSE на тестовых выборках для разных периодов входных данных

Период входных данных	Ошибка MSE	
	Москва	Ростов-на-Дону
Год	5.04×10^{-5}	2.94×10^{-5}
Месяц	5.29×10^{-5}	3.09×10^{-5}
Неделя	5.54×10^{-5}	3.23×10^{-5}
День	6.05×10^{-5}	3.53×10^{-5}

Разработанная модель RNN показала высокую точность прогнозирования влажности почвы на тестовых выборках для обоих регионов и при различных периодах входных данных. Низкие значения ошибки MSE и соответствие прогнозируемых значений реальным данным подтверждают целесообразность её использования. Результаты также указывают на необходимость дальнейшей оптимизации модели для более сложных типов почв и условий, таких как глинистая почва в Москве.

Заключение. В ходе исследования была разработана и протестирована модель рекуррентной нейронной сети (RNN) для прогнозирования временных рядов влажности почвы в рамках системы «Умный сад». Выполненный анализ показал, что модель демонстрирует высокую точность и отказоустойчивость при работе с различными типами почв и климатическими условиями, а также обладает низкой зависимостью от полноты входных данных.

На основе проведённого моделирования установлено, что:

- Разработанная модель RNN позволяет корректно прогнозировать значения влажности почвы для тестовых выборок, о чём свидетельствуют низкие значения среднеквадратичной ошибки (MSE), составившие 5.04×10^{-5} для глинистой почвы (Москва) и 2.94×10^{-5} для суглинистой почвы (Ростов-на-Дону).
- Модель сохраняет устойчивость к сбоям в работе сенсоров и ограниченности входных данных, что делает её эффективной для использования в реальных условиях, в том числе при недостатке измерений.
- Для сложных типов почв, таких как глинистая, характерен больший разброс значений ошибок, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации модели.

Проведённые эксперименты подтвердили, что разработанная архитектура RNN способна учитывать сложные зависимости во временных рядах влажности почвы и адаптироваться к особенностям разных регионов. Модель может быть успешно интегрирована в системы мониторинга, такие как «Умный сад», для повышения точности прогнозирования и устойчивости к отказам.

Перспективы дальнейшей работы включают:

1. Оптимизацию модели для сложных типов почв с учётом их гетерогенности.
2. Интеграцию дополнительных данных (например, состава почвы или уровня органических веществ) для повышения точности прогнозов.
3. Адаптацию модели для применения в других климатических и экологических условиях, что обеспечит универсальность её использования.

Таким образом, представленная в статье модель RNN открывает новые возможности для точного мониторинга влажности почвы и эффективного управления водными ресурсами в системах сельского хозяйства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Anagnostopoulos V. et al.* A modernized version of a 1D soil vegetation atmosphere transfer model for improving its future use in land surface interactions studies // Environmental Modelling & Software. – 2017. – Vol. 90. – P. 147-156. – https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.004.

2. *Gili P. et al.* An unmanned lighter-than-air platform for large scale land monitoring // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 13. – P. 2523. – https://doi.org/10.3390/rs13132523.
3. *Sadeghi M. et al.* The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations // Remote sensing of environment. – 2017. – Vol. 198. – P. 52-68. – https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.041.
4. *Dubois P.C., Van Zyl J., Engman T.* Measuring soil moisture with imaging radars // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 1995. – Vol. 33, No. 4. – P. 915-926.
5. *Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.T.* An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces // IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1992. – Vol. 30, No. 2. – P. 370-381. – https://doi.org/10.1109/36.134086.
6. *Attema E.P.W., Ulaby F.T.* Vegetation modeled as a water cloud // Radio science. – 1978. – Vol. 13, No. 2. – P. 357-364. – https://doi.org/10.1029/RS013i002p00357.
7. *Rice S.O.* Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces // Communications on pure and applied mathematics. – 1951. – Vol. 4, No. 2-3. – P. 351-378. – https://doi.org/10.1002/cpa.3160040206.
8. *Beckmann P., Spizzichino A.* The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces // Norwood. – 1987.
9. *Fung A.K., Li Z., Chen K.S.* Backscattering from a randomly rough dielectric surface // IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing. – 1992. – Vol. 30, No. 2. – P. 356-369. – https://doi.org/10.1109/36.134085.
10. *Shi J. et al.* A parameterized multifrequency-polarization surface emission model // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 2005. – Vol. 43, No. 12. – P. 2831-2841. – https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.857902.
11. *Njoku E.G. et al.* Soil moisture retrieval from AMSR-E // IEEE transactions on Geoscience and remote sensing. – 2003. – Vol. 41, No. 2. – P. 215-229. – https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.808243.
12. *Kui L. et al.* Wide-area soil moisture retrieval using SAR images and multispectral data // Trans. Chin. Soc. Agric. Eng. – 2020. – Vol. 36 (7). – P. 134-140. – https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2020.07.015.
13. *Wu S. et al.* Joint retrieval of soil moisture from Sentinel-1 and Sentinel-2 remote sensing data based on neural network algorithm // Transactions of Atmospheric Sciences. – 2021. – Vol. 44, No. 4. – P. 636-644. – https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20190419001.
14. *Chen S. et al.* Spatial downscaling methods of soil moisture based on multisource remote sensing data and its application // Water. – 2019. – Vol. 11, No. 7. – P. 1401. – https://doi.org/10.3390/w11071401.
15. *Zhao W. et al.* A spatial downscaling approach for the SMAP passive surface soil moisture product using random forest regression // Journal of hydrology. – 2018. – Vol. 563. – P. 1009-1024. – https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.081.
16. *Zhang Q.* Precision agriculture technology for crop farming. – Taylor & Francis, 2016. – 374 с. – https://doi.org/10.1201/b19336.
17. *Слинько О.В., Кондратьев О.В.* Роботизированные средства в садоводстве // Теория и практика современной аграрной науки. – 2022. – С. 615-618.
18. *Кондратьева О.В., Слинько О.В., Федоров А.Д.* Развитие роботизированных систем в садоводстве // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития. – 2023. – С. 100-106.
19. *Stafford J. et al.* Precision agriculture for sustainability. – Burleigh Dodds Science Publishing Limited, 2019. – 494 с. – https://doi.org/10.1201/9781351114592.
20. *Philip J.R.* The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution // Soil science. – 1957. – Vol. 83, No. 5. – P. 345-358. – http://dx.doi.org/10.1097/00010694-195705000-00002.
21. *Despommier D.* The vertical farm: Feeding the world in the 21st century. – New York: St. – Martin's Press, 2010. – 159 с.
22. *Wang Y. et al.* GSSM: A global seamless soil moisture dataset from 1981 to 2022 matching CCI to SMAP with a novel bias correction method // Earth System Science Data Discussions. – 2024. – Vol. 2024. – P. 1-27. – https://doi.org/10.5194/essd-2024-200.
23. *Lamprecht C.* Meteostat API. – Режим доступа: https://meteostat.net/en/blog/introduction-meteostat-rapidapi.

REFERENCES

1. *Anagnostopoulos V. et al.* A modernized version of a 1D soil vegetation atmosphere transfer model for improving its future use in land surface interactions studies, *Environmental Modelling & Software,* 2017, Vol. 90, pp. 147-156. Available at: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.004.
2. *Gili P. et al.* An unmanned lighter-than-air platform for large scale land monitoring, *Remote Sensing,* 2021, Vol. 13, No. 13, pp. 2523. Available at: https://doi.org/10.3390/rs13132523.

3. *Sadeghi M. et al.* The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations, *Remote sensing of environment,* 2017, Vol. 198, pp. 52-68. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.041.
4. *Dubois P.C., Van Zyl J., Engman T.* Measuring soil moisture with imaging radars, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing,* 1995, Vol. 33, No. 4, pp. 915-926.
5. *Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.T.* An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces, *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 1992, Vol. 30, No. 2, pp. 370-381. Available at: https://doi.org/10.1109/36.134086.
6. *Attema E.P.W., Ulaby F.T.* Vegetation modeled as a water cloud, *Radio science,* 1978, Vol. 13, No. 2, pp. 357-364. Available at: https://doi.org/10.1029/RS013i002p00357.
7. *Rice S.O.* Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces, *Communications on pure and applied mathematics,* 1951, Vol. 4, No. 2-3, pp. 351-378. Available at: https://doi.org/10.1002/cpa.3160040206.
8. *Beckmann P., Spizzichino A.* The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces, *Norwood,* 1987.
9. *Fung A.K., Li Z., Chen K.S.* Backscattering from a randomly rough dielectric surface, *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing,* 1992, Vol. 30, No. 2, pp. 356-369. Available at: https://doi.org/10.1109/36.134085.
10. *Shi J. et al.* A parameterized multifrequency-polarization surface emission model, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing,* 2005, Vol. 43, No. 12, pp. 2831-2841. Available at: https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.857902.
11. *Njoku E.G. et al.* Soil moisture retrieval from AMSR-E, *IEEE transactions on Geoscience and remote sensing,* 2003, Vol. 41, No. 2, pp. 215-229. Available at: https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.808243.
12. *Kui L. et al.* Wide-area soil moisture retrieval using SAR images and multispectral data, *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2020, Vol. 36 (7), pp. 134-140. Available at: https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2020.07.015.
13. *Wu S. et al.* Joint retrieval of soil moisture from Sentinel-1 and Sentinel-2 remote sensing data based on neural network algorithm, *Transactions of Atmospheric Sciences,* 2021, Vol. 44, No. 4, pp. 636-644. Available at: https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20190419001.
14. *Chen S. et al.* Spatial downscaling methods of soil moisture based on multisource remote sensing data and its application, *Water,* 2019, Vol. 11, No. 7, pp. 1401. Available at: https://doi.org/10.3390/w11071401.
15. *Zhao W. et al.* A spatial downscaling approach for the SMAP passive surface soil moisture product using random forest regression, *Journal of hydrology,* 2018, Vol. 563, pp. 1009-1024. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.081.
16. *Zhang Q.* Precision agriculture technology for crop farming. Taylor & Francis, 2016, 374 p. Available at: https://doi.org/10.1201/b19336.
17. *Slin'ko O.V., Kondrat'ev O.V.* Robotizirovannye sredstva v sadovodstve [Robotic tools in horticulture], *Teoriya i praktika sovremennoy agrarnoy nauki* [Theory and practice of modern agricultural science], 2022, pp. 615-618.
18. *Kondrat'eva O.V., Slin'ko O.V., Fedorov A.D.* Razvitie robotizirovannykh sistem v sadovodstve [Development of robotic systems in horticulture], *Agropromyshlennyy kompleks: problemy i perspektivy razvitiya* [Agro-industrial complex: problems and development prospects], 2023, pp. 100-106.
19. *Stafford J. et al.* Precision agriculture for sustainability. Burleigh Dodds Science Publishing Limited, 2019, 494 p. Available at: https://doi.org/10.1201/9781351114592.
20. *Philip J.R.* The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution, *Soil science,* 1957, Vol. 83, No. 5, pp. 345-358. Available at: http://dx.doi.org/10.1097/00010694-195705000-00002.
21. *Despommier D.* The vertical farm: Feeding the world in the 21st century. New York: St. – Martin's Press, 2010, 159 p.
22. *Wang Y. et al.* GSSM: A global seamless soil moisture dataset from 1981 to 2022 matching CCI to SMAP with a novel bias correction method, *Earth System Science Data Discussions,* 2024, Vol. 2024, pp. 1-27. Available at: https://doi.org/10.5194/essd-2024-200.
23. *Lamprecht C.* Meteostat API. Available at: https://meteostat.net/en/blog/introduction-meteostat-rapidapi.

Обаид Саадулдин Садах – Тамбовский государственный технический университет; e-mail: saadmonster555@gmail.com; г. Тамбов, Россия; кафедра «Информационные процессы и управление»; аспирант; ORCID: 0009-0002-76953257; SPIN-код: 9620-2914.

Погонин Василий Александрович – Тамбовский государственный технический университет; e-mail: pogvas@inbox.ru; г. Тамбов, Россия; кафедра «Информационные процессы и управление»; д.т.н.; профессор; SPIN-код: 3040-4060.

Кирина Ирина Борисовна – Мичуринский государственный аграрный университет; e-mail: rodina1947@mail.ru; г. Мичуринск, Россия; кафедра «Садоводства, биотехнологий, селекции и семеноводства сельскохозяйственных культур»; к.с.-х.н.; доцент; зав. кафедрой; ORCID: 0000-0001-6765-8753; SPIN-код: 7143-4500.

Obaid Saaduldin Sadakh – Tambov State Technical University; e-mail: saadmonster555@gmail.com; Tambov, Russia; the Department of Information Processes and Management; postgraduate student; ORCID: 0009-0002-76953257; SPIN code: 9620-2914.

Pogonin Vasily Aleksandrovich – Tambov State Technical University; e-mail: pogvas@inbox.ru; Tambov, Russia; the Department of Information Processes and Management; dr. of eng. sc.; professor; SPIN-code: 3040-4060.

Kirina Irina Borisovna – Michurinsk State Agrarian University; e-mail: rodina1947@mail.ru; Michurinsk, Russia; the Department of "Horticulture, Biotechnology, Breeding and Seed Production of Agricultural Crops"; cand. of agr. sc.; associate professor; head of department; ORCID: 0000-0001-6765-8753; SPIN-code: 7143-4500.

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 объёмом ***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 взымается.

Адрес журнала в Интернете: http://izv-tn.tti.sfedu.ru/.