

ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

12+



**БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ХАНТЫ-МАНСКИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ
«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ВЕСТНИК КИБЕРНЕТИКИ
PROCEEDINGS IN CYBERNETICS**

Научный журнал

ТОМ 22, № 3

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Сургут
2023**

Учредитель и издатель
Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»

Главный редактор
Острейковский Владислав Алексеевич, д. т. н., профессор

Заместитель главного редактора
Тараканов Дмитрий Викторович, к. т. н., доцент

Ответственный секретарь
Брагинский Михаил Яковлевич, к. т. н., доцент

Члены редакционной коллегии:
Советов Б. Я., академик РАН и РАО, д. т. н., профессор
Юсупов Р. М., член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор
Абрамов О. В., д. т. н., профессор
Анохин А. Н., д. т. н., профессор
Антонов А. В., д. т. н., профессор
Бурханов Р. А., д. филос. н., профессор
Бушмелева К. И., д. т. н., профессор
Гетман А. Ф., д. т. н., профессор
Григорьев Л. И., д. т. н., профессор
Древс Ю. Г., д. т. н., профессор
Ельников А. В., д. ф.-м. н., профессор
Инютин С. А., д. т. н., профессор
Каштанов В. А., д. ф.-м. н., профессор
Керимов Т. Х., д. филос. н., профессор
Крамаров С. О., д. ф.-м. н., профессор
Леонов Д. Г., д. т. н., профессор
Мальшев Д. С., д. ф.-м. н., профессор
Мельников А. В., д. т. н., профессор
Певзнер Л. Д., д. т. н., профессор
Увайсов С. У., д. т. н., профессор
Цибульский В. Р., д. т. н., профессор
Юрков Н. К., д. т. н., профессор

Выпускающий редактор
Хасанова А. Ш.

Редактор
Манаева Л. И.

Верстка
Мельниковой Е. А.

Переводчик
Петрова А. В.

Рисунок на обложке:
Визуализация магнитогидродинамических расчетов для точного решения внутри сферы
© Галкин В. А., Гореликов А. В.

Решением Высшей аттестационной комиссии с 29 мая 2017 года 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». С 29.03.2022 издание принимает к публикации статьи по следующим научным специальностям: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации
Эл № ФС77-83015 от 31.03.2022.

Издается с 2002 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:
БУ ВО «Сургутский государственный университет»,
628412, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Сургут, пр. Ленина, 1
Тел.: +7 (3462) 76-29-88, факс: +7 (3462) 76-29-29, e-mail: proceed.cyber@mail.ru. Сайт: vestcyber.ru

Founder and Publisher
Surgut State University

Chief Editor

Prof. Vladislav A. Ostreikovskiy, Doctor of Sciences (Engineering)

Vice Chief Editor

Dmitry V. Tarakanov, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

Executive Editor

Mikhail Ya. Braginsky, Candidate of Sciences (Engineering), Docent

Editorial Board:

Prof. Sovetov B. Ya., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS), the Russian Academy of Education (RAE)

Prof. Yusupov R. M., Doctor of Sciences (Engineering), member of the Russian Academy of Sciences (RAS)

Prof. Abramov O. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Anokhin A. N., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Antonov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Burkhanov R. A., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Bushmeleva K. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Getman A. F., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Grigoryev L. I., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Drevs Yu. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Elnikov A. V., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Inyutin S. A., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Kashtanov V. A., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Kerimov T. Kh., Doctor of Sciences (Philosophy)

Prof. Kramarov S. O., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Leonov D. G., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Malyshev D. S., Doctor of Sciences (Phys&Math)

Prof. Melnikov A. V., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Pevzner L. D., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Uvaisov S. U., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Tsibulsky V. R., Doctor of Sciences (Engineering)

Prof. Yurkov N. K., Doctor of Sciences (Engineering)

Publishing Editor

Khasanova A. Sh.

Editor

Manaeva L. I.

Layout

Melnikova E. A.

Translator

Petrova A. V.

Cover Image:

A visualization of magnetohydrodynamic analysis used to find an exact solution within a sphere

© Galkin V. A., Gorelikov A. B.

Since 29.05.2017 the journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals of the Higher Attestation Commission, which publishes main scientific results of Doctor's and Candidate's theses.

Since March 29, 2022, the journal is included in the List on the following subject groups:

- 2.3.1. System Analysis, Data Management and Processing; 1.2.2. Mathematical Modeling, Calculus and Program Complexes; 2.2.2. Electronic Component Base of Micro- and Nanoelectronics, Quantum Devices.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Mass media registration certificate El No. FS77-83015 dated on 31.03.2022.

Published since 2002. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

Surgut State University, Russia 628412, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra, Surgut, Lenina pr., 1
Tel.: +7 (3462) 76-29-88, fax: +7 (3462) 76-29-29, e-mail: proceed.cyber@mail.ru. Web: vestcyber.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Башкиров А. В., Гвозденко С. А., Пирогов А. А., Сёмка Э. В. Конфигурируемый сложнофункциональный блок обработки цифровых сигналов	6
Васильев А. А., Нестеров А. С. Применение алгоритмов формирования вопросов по тексту для автоматической генерации тестов	17
Дёмко А. И. О связи корреляционных свойств сигналов на основе кодов Фрэнка с погрешностями их формирования	23
Ковалева О. А., Саплина А. Б., Ковалев С. В., Сидляр М. Ю., Казарин И. С. Мультиагентное моделирование динамики развития городской среды	32
Панин М. А., Мамедов Э. Ш., Тараканов Д. В. Нейросетевой анализ цифровых изображений лейкоцитов для обнаружения заболеваний крови	43
Попов Ю. Б., Корнаков А. П., Попова К. Ю., Макаров Е. В. Определение скорости и направления ветра с помощью беспилотного летательного аппарата	52
Прудников С. И. Оценивание качества автоматизированного обнаружения вредоносной информации	60
Синицын Н. Н., Запатрина Н. В., Сарычева И. А., Грибкова Ю. В., Голицына Е. В., Донцова Ю. В. Математическое моделирование высокотемпературной сушки капли окалиномасло-содержащего шлама при ее движении в закрученном потоке газа	66
Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Интеллектуальная система прогнозирования температуры на основе модифицированной нечеткой нейросети	76

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Корнеенко В. П. Многокритериальное планирование работы центра управления полетом космических аппаратов на динамической модели с тупиковыми управлениями	82
Носков С. И., Тирских В. В. Идентификация параметров кусочно-линейной функции риска методом антиробастного оценивания	99
50 лет Рыжакову Виталию Владимировичу	105

CONTENTS

ENGINEERING

<i>Bashkirov A. V., Gvozdenko S. A., Pirogov A. A., Syomka E. V.</i> Configurable complex function block for digital signal processing	6
<i>Vasilyev A. A., Nesterov A. S.</i> Applying text questions generation algorithms for automatic test generation	17
<i>Dyomko A. I.</i> On relation between correlation characteristics of signals based on the Frank codes and their formation errors	23
<i>Kovaleva O. A., Saplina A. B., Kovalev S. V., Sidlyar M. Yu., Kazarin I. S.</i> Agent-based modeling for urban development dynamics	32
<i>Panin M. A., Mamedov E. Sh., Tarakanov D. V.</i> An analysis of digital images using neural networks to detect hematologic diseases	43
<i>Popov Yu. B., Kornakov A. P., Popova K. Yu., Makarov E. V.</i> Measuring wind velocity using unmanned aerial vehicle	52
<i>Prudnikov S. I.</i> Assessing the quality of automated malicious information detection	60
<i>Sinitsyn N. N., Zapatrina N. V., Sarycheva I. A., Gribkova Yu. V., Golitsyna E. V., Dontsova Yu. V.</i> Mathematical simulation of high-temperature drying of a drop of scale- and oil-containing sludge when moving in a swirling gas flow	66
<i>Engel E. A., Engel N. E.</i> An intelligent system for temperature forecasting based on a modified fuzzy neural network	76

PHYSICS AND MATHEMATICS

<i>Korneenko V. P.</i> Multi-criterial scheduling of a spacecraft control center's operation on a dynamic model with dead-end controls	82
<i>Noskov S. I., Tirskikh V. V.</i> Identifying parameters of a piecewise linear risk function with a method of antirobust estimation	99
<i>Celebrating 50th Jubilee of Vitaly Vladimirovich Ryzhakov</i>	105

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья
УДК 621.391
DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-6-16

КОНФИГУРИРУЕМЫЙ СЛОЖНОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

*Алексей Викторович Башкиров*¹, *Сергей Анатольевич Гвозденко*²,
*Александр Александрович Пирогов*³, *Элеонора Викторовна Сёмка*⁴✉
^{1, 2, 3} Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
⁴ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия
¹ fab7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0939-722X>
² jgsar@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7262-9748>
³ Pirogov.alx@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5105-0505>
⁴ semka_elya@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

Аннотация. По результатам анализа типов и структур цифровых фильтров с конечной и бесконечной импульсной характеристикой и принципов их работы создана методика получения универсальной и устойчивой системы обработки сигналов с помощью конфигурируемого сложнофункционального блока их цифровой обработки на базе программируемых логических интегральных схем и фильтров разных типов, которая позволит создавать программно-аппаратные устройства под требуемый набор параметров обработки.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, система цифровой обработки сигналов, цифровой фильтр, программируемая логическая интегральная схема

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011).

Для цитирования: Башкиров А. В., Гвозденко С. А., Пирогов А. А., Сёмка Э. В. Конфигурируемый сложнофункциональный блок обработки цифровых сигналов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 6–16. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-6-16.

Original article

CONFIGURABLE COMPLEX FUNCTION BLOCK FOR DIGITAL SIGNAL PROCESSING

*Aleksey V. Bashkirov*¹, *Sergey A. Gvozdenko*², *Aleksandr A. Pirogov*³, *Eleonora V. Syomka*⁴✉
^{1, 2, 3} Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia
⁴ Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky
and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia
¹ fab7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0939-722X>
² jgsar@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7262-9748>
³ Pirogov.alx@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5105-0505>
⁴ semka_elya@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

Abstract. According to the findings of an analysis of the types and structures of digital filters with finite- and infinite-impulse responses and the principles of their operation, a method for establishing a universal and stable system for signal processing has been developed using a configurable complex function block of digital signal processing based on the programming logical integral schemes and various types of filters in order to develop a software and hardware devices suitable for a set of processing parameters.

Keywords: unmanned aircraft systems, digital signals processing system, digital filter, programmed logical integral scheme

Funding: the study is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of a State task (project No. FZGM-2023-0011).

For citation: Bashkirov A. V., Gvozdenko S. A., Pirogov A. A., Syomka E. V. Configurable complex function block for digital signal processing. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):6–16. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-6-16.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая фильтрация распознанных сигналов является обязательной процедурой при обнаружении и распознавании сообщений. Под фильтрацией понимают любое преобразование сигнала, при котором во входной последовательности обрабатываемых данных целенаправленно изменяются определенные соотношения между различными параметрами сигнала. Системы, которые выборочно изменяют форму сигнала, устраняют или уменьшают помехи, извлекают из сигналов определенную информацию и т. д., называются фильтрами. Соответственно, фильтры любого назначения являются частным случаем систем преобразования сигналов. Термин «цифровой фильтр» относится к аппаратной или программной реализации математического алгоритма, который определенным образом преобразует цифровой сигнал. Классификация цифровых фильтров обычно основывается на функциональных характеристиках алгоритмов цифровой фильтрации [1–3]. Цифровые фильтры могут иметь параметры, которые невозможно реализовать в аналоговых фильтрах, не требуют периодического контроля и калибровки, а один фильтр может обрабатывать несколько входных каналов или сигналов, при этом точность ограничивается только используемой разрядностью отсчетов [4]. Такие фильтры используются в цифровых авиационных системах и наиболее востребованы в комплексах самолетного типа, имеющих по сравнению с другими фильтрами низкую траекторную нестабильность. Более того, реализация блоков цифровой обработки сигналов на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) значительно упростит аппаратные затраты и позволит максимально эффективно использовать эти возможности цифровых фильтров.

За последнее десятилетие индустрия беспилотных авиационных систем резко выросла.

Это связано с технологическими тенденциями и быстрым прогрессом в области управления, миниатюризации и компьютеризации, кульминацией которых являются безопасные, легкие, надежные и более экономичные беспилотные авиационные системы [5]. В связи с расширением применения беспилотных авиационных систем и увеличением поставленных задач – от стратегического и оперативного до тактического уровня, необходимо знание их потенциала и характеристик, а также представление о возможных проблемах с функциональностью.

С целью получения принципиально новых программно-аппаратных архитектур были выполнены:

1. Анализ существующих на сегодняшний день методик преобразования сигналов.
2. Изучены способы реализации известных архитектур цифровых фильтров.
3. Сформированы требования к итерационно-вычислительному блоку, применимому в большинстве известных архитектур цифровых фильтров.
4. Сформированы требования к системе вычислительных блоков для их совместной работы в системе обработки сигналов.
5. Проведена корректировка требований, предъявляемых к блоку, учитывая проблематику групповой работы итерационно-вычислительных блоков в составе системы обработки сигналов.
6. Разработаны архитектуры итерационно-вычислительного блока и их интеграция в систему.

Цель – проведение изысканий в области цифровой обработки сигналов для получения принципиально новых программно-аппаратных архитектур, разработка модели RTL (register transfer level, уровень передачи регистров) сложнофункционального блока (СФ-блока) системы цифровой обработки сигналов, ее верификация как на логическом, так и на физическом уровне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Анализ современных систем цифровой обработки сигналов беспилотных летательных аппаратов

Особенностью цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ) является их ограничение по времени. Фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) отличаются наличием обратной связи. На рис. 1–2 представлены схемы указанных архитектур. В КИХ-фильтрах для вычисления значений выходных сигналов $y(n)$ используются текущие значения входных сигналов $x(n)$, которые определяются мгновенным значением и суммой \sum предыдущих отчетов линии z^{-1} с учетом заданных коэффициентов фильтра b_n . Преимуществом КИХ-фильтров является их высокая устойчивость и возможность формирования требуемой фазовой и амплитудно-частотной характеристики. Но КИХ-фильтры в значительной мере требовательны к ресурсам системы обработки сигналов, а также обладают достаточно высокими показателями задержки [6–8]. БИХ-фильтры отличаются более низкой задержкой и простотой расчета, но наличие обратной связи (учет коэффициентов a^n) может привести к снижению устойчивости при работе.

венным значением и суммой \sum предыдущих отчетов линии z^{-1} с учетом заданных коэффициентов фильтра b_n . Преимуществом КИХ-фильтров является их высокая устойчивость и возможность формирования требуемой фазовой и амплитудно-частотной характеристики. Но КИХ-фильтры в значительной мере требовательны к ресурсам системы обработки сигналов, а также обладают достаточно высокими показателями задержки [6–8]. БИХ-фильтры отличаются более низкой задержкой и простотой расчета, но наличие обратной связи (учет коэффициентов a^n) может привести к снижению устойчивости при работе.

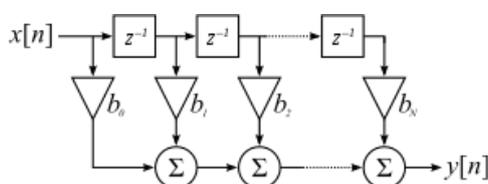


Рис. 1. Фильтр с конечной импульсной характеристикой

Примечание: составлено авторами по [6].

Рассмотрев ключевые особенности различных типов фильтров, авторы выявили, что для построения универсальной конфигурируемой системы цифровой обработки сигналов необ-

ходимо использовать программно-аппаратные модели фильтров для корректировки их параметров в процессе работы с учетом их архитектурных преимуществ и недостатков.

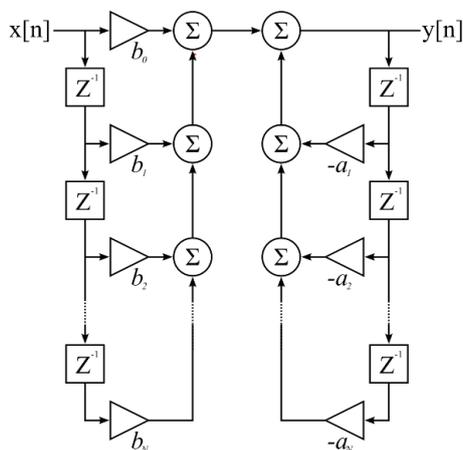


Рис. 2. Фильтр с бесконечной импульсной характеристикой

Примечание: составлено авторами по [6].

2. Разработка программируемого СФ-блока цифровой обработки сигналов на базе программируемых логических интегральных схем

СФ-блок цифровой обработки сигналов обеспечивает работу цифрового фильтра с ко-

нечной импульсной характеристикой в разных режимах путем программного задания его параметров (рис. 3). В модели предусмотрен ряд периферийных блоков, обеспечивающих работу фильтра в тестовом режиме [9].

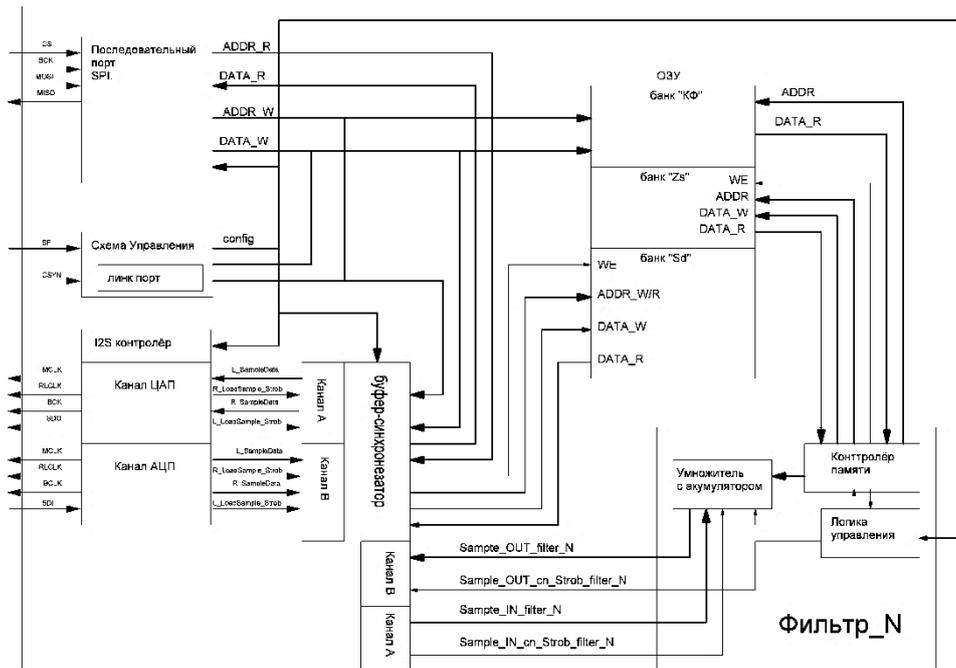


Рис. 3. Общая функциональная схема программно-аппаратного сложнофункционального блока
 Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Программно-аппаратный модуль позволяет обеспечить обработку сигналов, содержит ряд блоков, которые рассмотрим ниже.

Вычислительный блок ядра фильтра (рис. 4) предназначен для производства итерационных операций над данными, получаемыми с входа из входного регистра данных блока, выходного регистра данных блока, а также

данных, получаемых от ведущего блока быстрого переноса при совместной работе нескольких блоков. Модуль включает в свою структуру два контроллера памяти, систему управления блоком, вычислителей смещений, вычислительный блок умножений и вычислительное устройство.

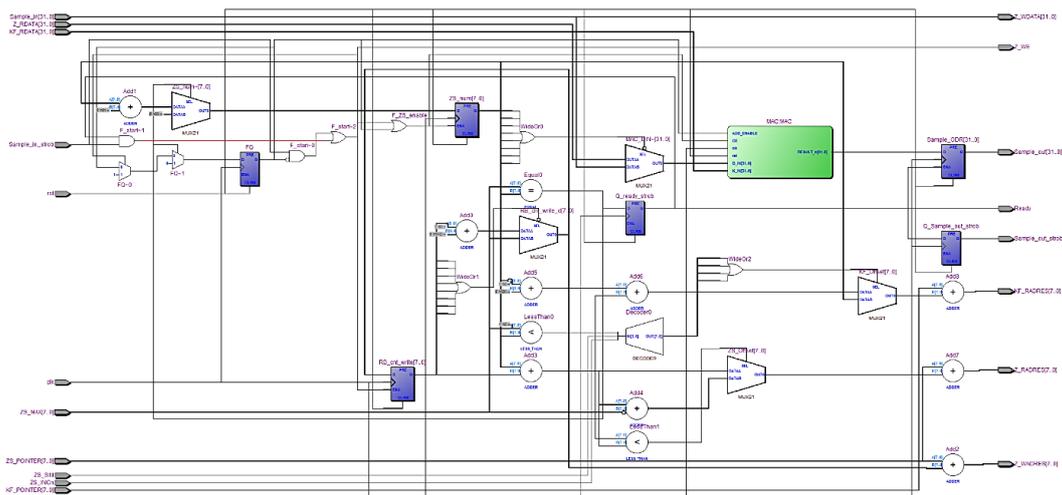


Рис. 4. Схема ядра фильтра

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Блок управления предназначен для контроля каскадами фильтра, выдачи сигналов управления чтения и записи данных в линию

сдвига. Блок умножителя осуществляет умножение данных с фиксированной точкой и их накопление (рис. 5).

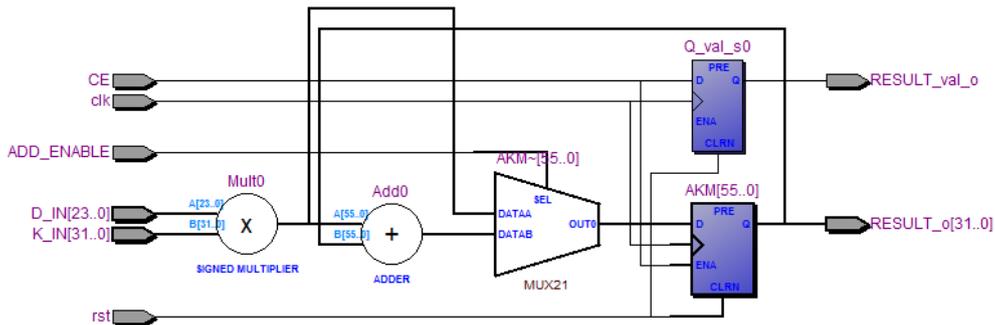


Рис. 5. Схема умножителя

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Была проведена верификация полученной модели, построены временные диаграммы работы модуля, представленные на рис. 6, кото-

рые подтверждают адекватность полученных моделей и соответствие результатов моделирования расчетным параметрам [10].

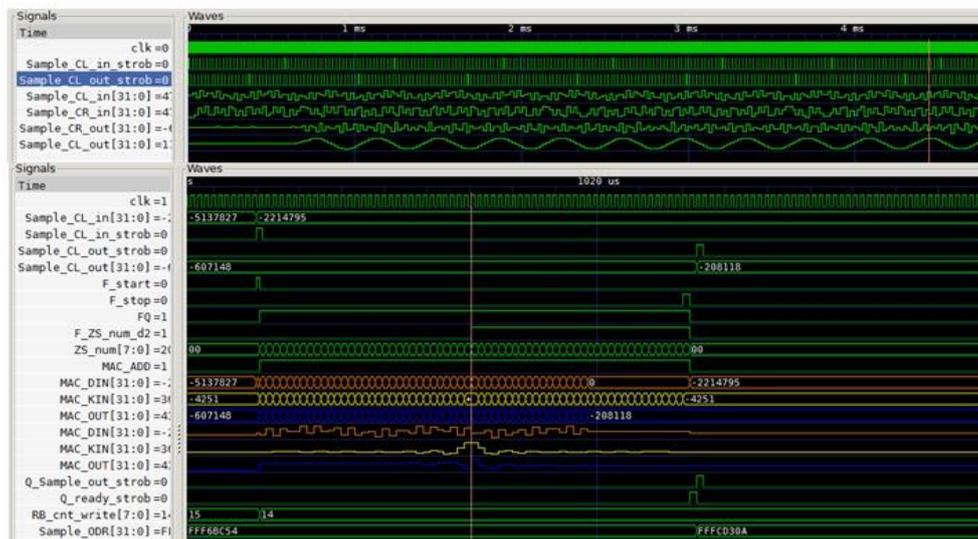


Рис. 6. Временная диаграмма работы фильтра

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 7 представлена схема периферийного блока I²S для передачи сигналов синхро-

низации данных, временная диаграмма блока представлена на рис. 8.

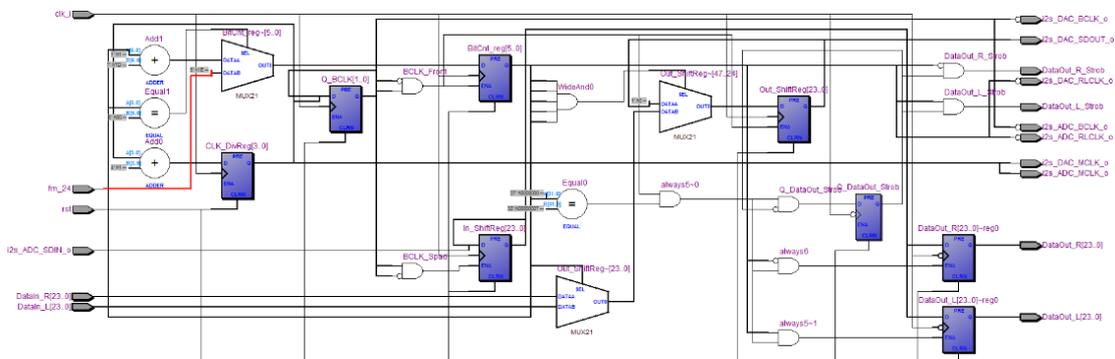


Рис. 7. Схема блока I²S

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.



Рис. 8. Временная диаграмма работы блока I²S

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Блок SPI (рис. 9) предназначен для получения доступа устройством управления к памяти и регистрам управления. На рис. 10 показана

временная диаграмма работы блока SPI в режиме «C-D8», на рис. 11 – временная диаграмма работы блока SPI в режиме «serial».

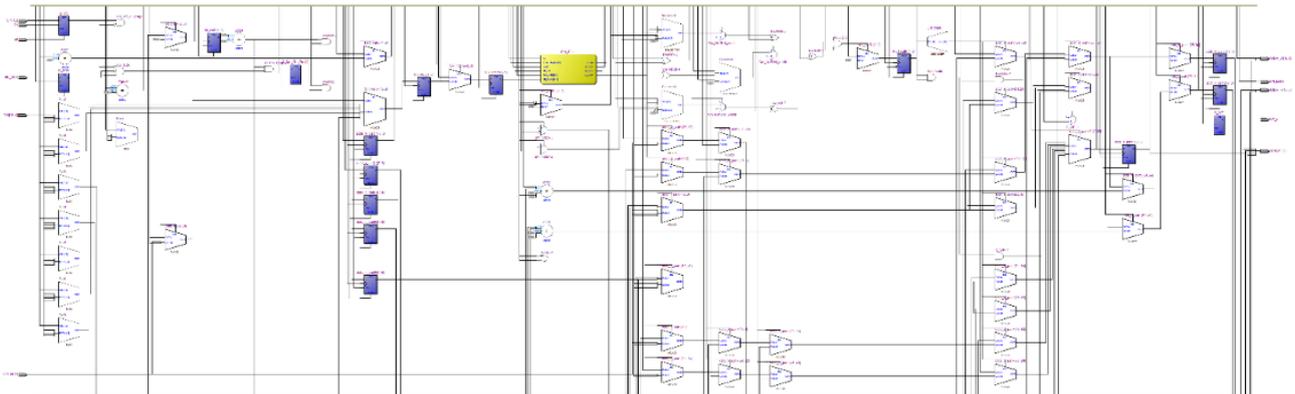


Рис. 9. Схема блока SPI

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

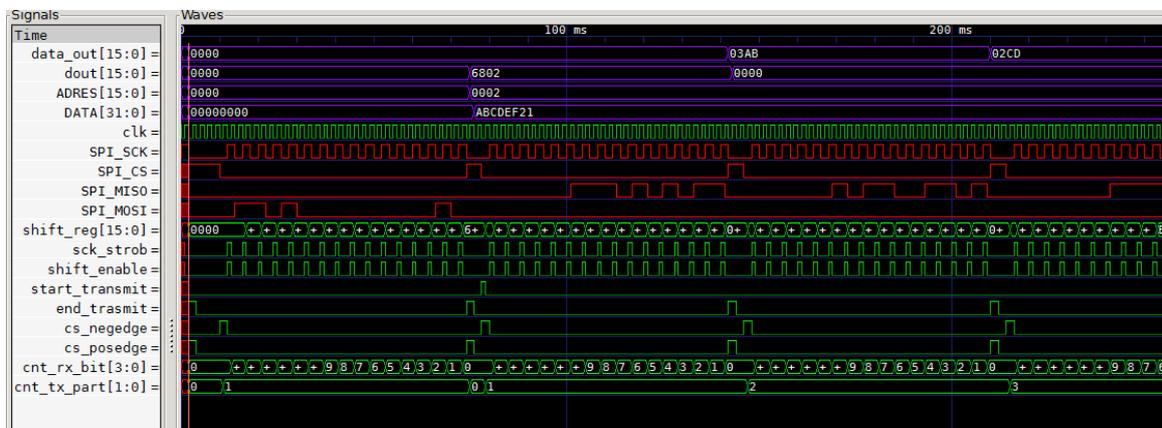


Рис. 10. Временная диаграмма работы блока SPI в режиме «C-D8»

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

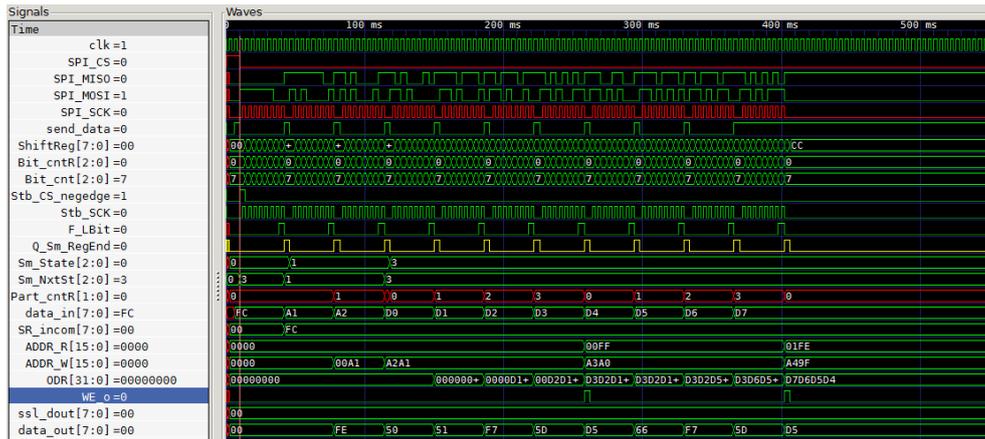


Рис. 11. Временная диаграмма работы блока SPI в режиме «serial»

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработана модель цифрового фильтра, способного на программном уровне перестраивать свою конфигурацию для обеспечения параллельной работы двух и более вычислительных блоков, которая позволяет декомпо-

зировать БИХ-фильтр. На рис. 12 представлены конфигурации вычислительных блоков для обработки разных ветвей БИХ-фильтра. Данные ветви могут быть обработаны одним программно-аппаратным блоком с реконфигурацией или в параллельном режиме.

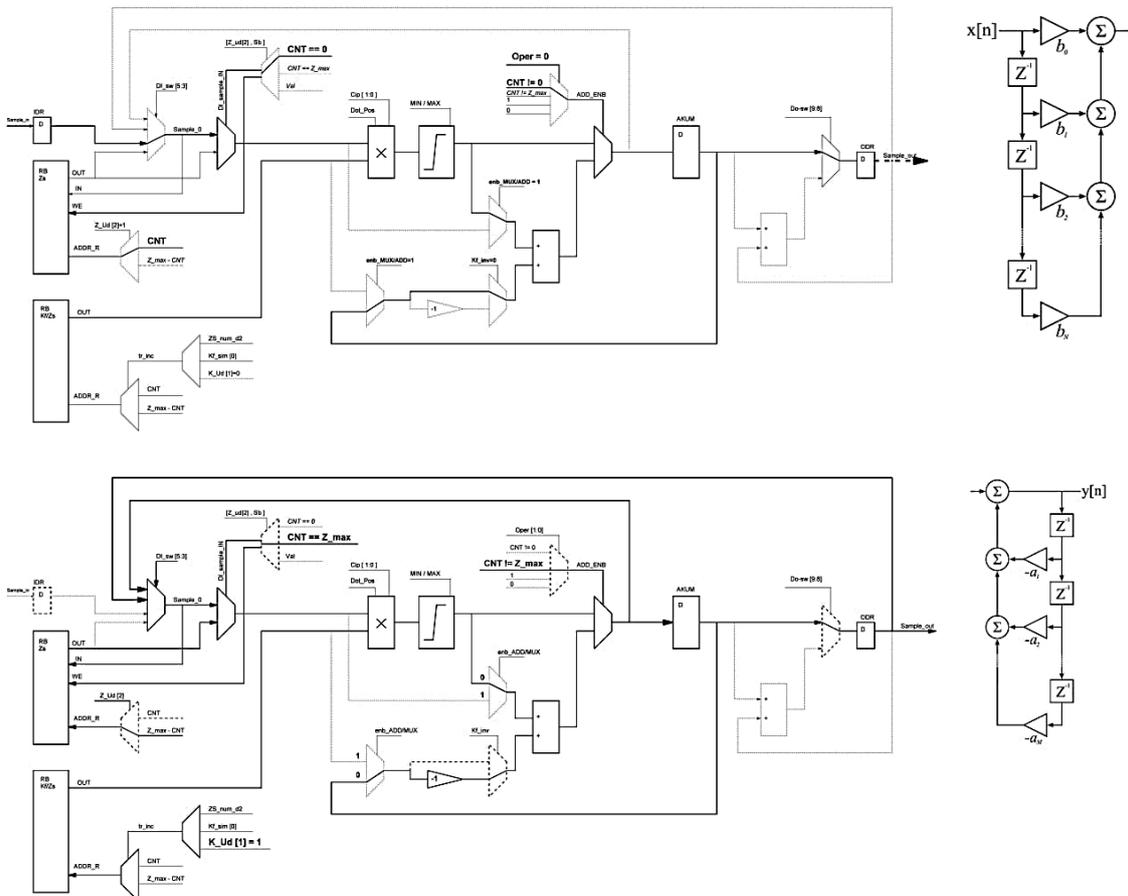


Рис. 12. Конфигурации вычислительных блоков для обработки разных ветвей фильтра с бесконечной импульсной характеристикой

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Данный программно-аппаратный модуль позволяет реализовать работу согласно архитектуре БИХ-фильтра с использованием одной линии задержки (рис. 13).

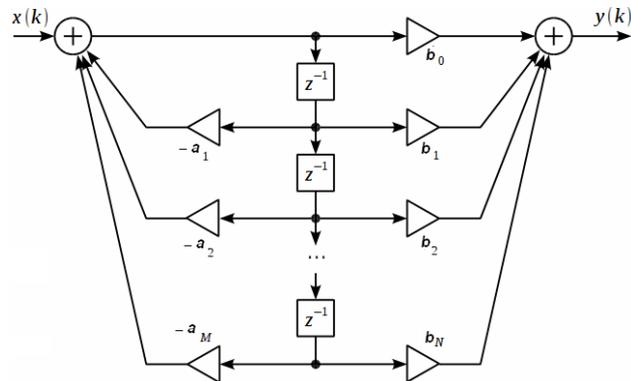


Рис. 13. Архитектура фильтра с бесконечной импульсной характеристикой с одной линией задержки
 Примечание: составлено авторами по [6].

Далее дадим разъяснение предложенной и реализованной методики декомпозиции цифровой системы обработки сигналов. Так как блоков несколько, а линия задержки одна на две ветви, возникает проблема доступа к одной и той же области памяти для двух ветвей и решение ее двумя способами, один

из которых представлен на рис. 14. Необходимо предоставить один канал к памяти для блоков и использовать вычислитель адреса ведущего блока, а данные, поступающие в ведущий блок, транслировать в ведомый, введя линию переноса.

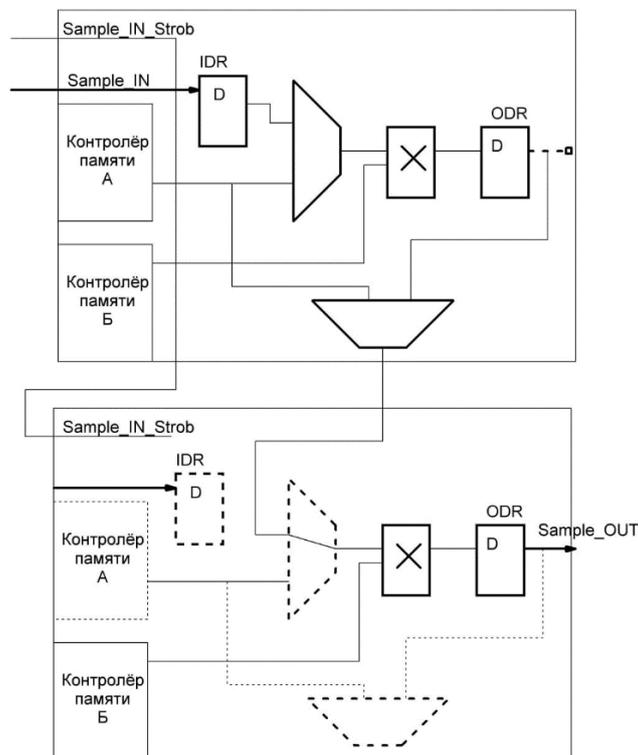


Рис. 14. Схема взаимодействия двух вычислительных блоков при вычислении с одной линией задержки фильтра

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Данный способ позволяет использовать DMA (direct memory access, прямой доступ к памяти) для использования внешней памяти. DMA – это режим обмена данными между функциональными узлами без участия в работе центрального процессора, что в целом увеличивает скорость обмена информацией и повышает эффективность работы всей системы. При количестве итераций, превышающих размерность буфера, существует возможность работы с DMA, область буфера разбивается на участки, когда счетчик итераций выходит за диапазон участка памяти. Для работы DMA требуется разбить пространство внутренней кэш-памяти на разделы и ввести счетчик раздела, при переполнении которого поступает команда для запуска канала DMA. По команде DMA начинается перенос данных раздела кэш-памяти во внешнюю память. Когда DMA закончит работу, то происходит сброс флага занятости страницы. Если вычислительный блок перешел к началу страницы памяти, а флаг при этом не сброшен, то блок выдает прерывание в системе управления, а при сбросе флага продолжит свою работу [11].

Есть другой способ: поскольку кэш-память имеет два независимых информационных порта, то можно дать вычислителям блоков, обрабатывающих разные ветви фильтра, разные каналы памяти, обеспечивающие доступ к единому адресному пространству памяти [12], тем самым исключив доступ к страницам памяти для DMA. Это не позволяет при помощи DMA расширить внутреннюю память вычислительных блоков за счет внешнего ресурса памяти. Данный способ актуален для работы, где нет необходимости иметь доступ к внешней памяти для вычислений большого количества итераций.

В разработанной модели были учтены оба способа, что позволяет сконфигурировать более универсальную и устойчивую систему цифровой обработки сигналов. Разработанная система обработки сигналов на основе полученных в ходе исследования сложно концентрируемых блоков была реализована и прошла физическую верификацию на базе отладочной платы Basys 2 с использованием ПЛИС Xilinx Spartan 3E [13]. Отладочная плата в своем составе имеет постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), необходимое

для записи и хранения прошивки программируемой пользователем вентильной матрицы. При подаче питания на плату на основе записанной прошивки в ПЗУ происходит конфигурирование вентильной матрицы, в результате чего получаем готовое к работе запрограммированное устройство. Отладочная плата содержит ряд элементов управления и индикации (переключатели, тактовые кнопки, светодиодные индикаторы, семисегментный индикатор), есть возможность использования дополнительных внешних устройств за счет их подключения к универсальным программируемым портам ввода/вывода. При проведении верификации использованы внешние модули аналогово-цифрового преобразователя и цифро-аналогового преобразователя для подачи и приема обработанного сигнала. В качестве устройства управления использован микроконтроллер, который при включении и по прерываниям от испытываемой системы производил смену конфигураций СФ-блоков и загружал коэффициенты фильтров во внутреннюю память. Реконфигурируемое устройство тестировалось в режимах работы фильтра нижних и верхних частот, полосового фильтра. Работа тестовой системы подтвердила результаты моделирования, из чего можно сделать вывод, что полученная модель является полной и работоспособной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного научного исследования был произведен анализ литературных источников, типов цифровых фильтров и принципов их работы. Рассмотрев ключевые особенности различных типов фильтров, авторы выявили, что для построения универсальной конфигурируемой системы цифровой обработки сигналов необходимо использовать программно-аппаратные модели фильтров для корректировки их параметров в процессе работы с учетом их архитектурных преимуществ и недостатков.

Разработана методика декомпозиции системы цифровой обработки сигналов, внутрисистемного взаимодействия моделей элементов системы цифровой обработки сигналов. В результате работы и моделирования получены модели конфигурируемого фильтра, проведена его верификация.

В целях верификации и подтверждения адекватности разработанной в ходе исследования методики была создана модель СФ-блок цифровой обработки сигналов. Данная модель реализована и прошла физическую верификацию на базе отладочной платы с использованием программируемых логических интегральных схем. В качестве управляющего устройства был использован микроконтроллер,

который загружает программу управления и таблицу коэффициентов фильтра. Реконфигурируемое устройство тестировалось в режимах работы фильтра нижних и верхних частот, полосового фильтра. Работа тестовой системы подтвердила результаты моделирования, из чего можно сделать вывод, что полученная модель является полной и работоспособной.

Список источников

1. Васюков В. Н. Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры в системах подвижной радиосвязи. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. 292 с.
2. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры / пер. с англ. М. : Мир, 1982. 592 с.
3. Екимов Е. Н., Платоненков С. В. Цифровые фильтры: виды и реализация // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ : сб. материалов Всерос. науч.-практич. конф., 18–20 ноября 2019 г., г. Северодвинск. Архангельск : ИД САФУ, 2020. С. 202–206.
4. Гулевич С. П., Александровский Б. В., Веселов Ю. Г. Обоснование основных требований к характеристикам движения беспилотных летательных аппаратов двойного назначения // Проблемы безопасности полетов. 2008. № 8. С. 25–39.
5. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред. М. Н. Красильщикова и Г. Г. Себрякова. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. 280 с.
6. Айфичер Э. С., Джервис Б. У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е изд. / пер. с англ. М. : Вильямс, 2004. 992 с.
7. Коберниченко В. Г. Основы цифровой обработки сигналов. Екатеринбург : Изд-во Урал. федер. ун-та, 2018. 150 с.
8. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / пер. с англ. под ред. А. А. Власенко. М. : Техносфера, 2010. 328 с.
9. Пирогов А. А., Пирогова Ю. А., Гвозденко С. А. и др. Разработка реконфигурируемых устройств на основе программируемых логических интегральных схем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16, № 6. С. 90–97.
10. Pirogov A. A., Glotov V. V., Pirogova Yu. A. et al. The development of dynamically reconfigurable devices of digital signal processing based on field programmable gate array. In: *AIP Conf Proc. Proceedings of the VII International Young Researchers Conference "Physics, Technology, Innovations (PTI-2020)"*, May 18–22, 2020, Yekaterinburg. Vol. 2313. p. 070022.
11. Богословский А. В., Разиньков С. Н., Сёмка Э. В. и др. Применение программируемых логических

References

1. Vasyukov V. N. Tsifrovaia obrabotka signalov i signalnye protsessory v sistemakh podvizhnoi radiosvi-azi. Novosibirsk: Publishing House of NSTU; 2006. 292 p. (In Russian).
2. Lam H. Analog and digital filters: Design and realization. Moscow: Mir; 1982. 592 p. (In Russian).
3. Ekimov E. N., Platonenkov S. V. Tsifrovye filtry: vidy i realizatsiia. In: *Proceedings of the All-Russian Research-to-Practice Conference "Aktualnye voprosy innovatsionnogo razvitiia Arkticheskogo regiona RF"*, November 18–20, 2019, Severodvinsk. Arkhangel'sk: Publishing House of NArFU; 2020. p. 202–206. (In Russian).
4. Gulevich S. P., Aleksandrovsky B. V., Veselov Yu. G. Obosnovanie osnovnykh trebovaniy k kharakteristikam dvizheniia bespilotnykh letatelnykh apparatov dvoynogo naznachenii. *Problemy bezopasnosti poletov*. 2008;(8):25–39. (In Russian).
5. Krasilshchikov M. N., Sebyakov G. G., editors. *Upravlenie i navedenie bespilotnykh manevrennykh letatelnykh apparatov na osnove sovremennykh informatsionnykh tekhnologii*. Moscow: FIZMATLIT; 2003. 280 p. (In Russian).
6. Ifeachor E. C., Jervis B. W. *Digital signal processing: A practical approach*. 2nd ed. Moscow: Williams; 2004. 992 p. (In Russian).
7. Kobernichenko V. G. *Osnovy tsifrovoi obrabotki signalov*. Yekaterinburg: Publishing House of UrFU; 2018. 150 p. (In Russian).
8. Kester W. *Mixed-signal and DSP design techniques*. Vlasenko A. A., editor. Moscow: Tekhnosfera; 2010. 328 p. (In Russian).
9. Pirogov A. A., Pirogova Yu. A., Gvozdenco S. A. et al. Development of reconfigurable devices based on programmable logic integrated circuits. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2020;16(6):90–97. (In Russian).
10. Pirogov A. A., Glotov V. V., Pirogova Yu. A. et al. The development of dynamically reconfigurable devices of digital signal processing based on field programmable gate array. In: *AIP Conf Proc. Proceedings of the VII International Young Researchers Conference "Physics, Technology, Innovations (PTI-2020)"*, May 18–22, 2020, Yekaterinburg. Vol. 2313. p. 070022.
11. Bogoslovsky A. V., Razinkov S. N., Syomka E. V. et al. Applying field programmable gate arrays in systems

интегральных схем в системах многоканальной цифровой обработки сигналов спутниковой навигации // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 13–20.

12. Новиков Ю. В., Skorobogatov P. K. Основы микропроцессорной техники. М. : НОЦ «ИНТУИТ», 2009. 357 с.
13. Нечаев Е. Е. К вопросу построения интегрированных навигационных систем на базе ПЛИС // Научный вестник МГТУ ГА. 2008. № 136. С. 85–95.

Информация об авторах

А. В. Башкиров – доктор технических наук, доцент, проректор по науке и инновациям.

С. А. Гвозденко – младший научный сотрудник.

А. А. Пирогов – кандидат технических наук, доцент.

Э. В. Сёмка – кандидат физико-математических наук, доцент.

of multichannel digital processing of satellite navigation signals. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):13–20. (In Russian).

12. Novikov Yu. V., Skorobogatov P. K. *Osnovy mikroprotsessornoj tekhniki*. Moscow: NOTs “INTUIT”; 2009. 357 p. (In Russian).
13. Nechaev E. E. On problem of integrated navigation systems on the basis of FPGA. *Civil Aviation High Technologies*. 2008;(136):85–95. (In Russian).

Information about the authors

A. V. Bashkirov – Doctor of Sciences (Engineering), Docent, Vice-Rector in Science and Innovations.

S. A. Gvozdenko – Junior Researcher.

A. A. Pirogov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

E. V. Syomka – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

Научная статья

УДК 004.6:004.8

DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-17-22

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ВОПРОСОВ ПО ТЕКСТУ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТЕСТОВ

Алексей Александрович Васильев^{1✉}, Андрей Сергеевич Нестеров²

^{1, 2} Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,

Новосибирск, Россия

¹ systems1@yandex.ru ✉

² nesterov@biik.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования ручных, полуавтоматизированных и автоматизированных способов генерации контрольных вопросов, основанных на методах аннотирования, выделения ключевых слов и использования обучающего набора данных (датасета) для формирования тестов к учебному материалу, с описанием алгоритма работы каждого метода, примеров сгенерированных вопросов и оценкой их качества. На тестовых примерах представлены преимущества алгоритма генерации метода с использованием датасета и комбинированных методов и их возможного применения на практике.

Ключевые слова: генерация вопросов по тексту, нейронные сети, сравнение методов генерации

Финансирование: работа выполнена в рамках Государственного задания № 071-03-2023-001.

Для цитирования: Васильев А. А., Нестеров А. С. Применение алгоритмов формирования вопросов по тексту для автоматической генерации тестов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 17–22. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-17-22.

Original article

APPLYING TEXT QUESTIONS GENERATION ALGORITHMS FOR AUTOMATIC TEST GENERATION

Aleksey A. Vasilyev^{1✉}, Andrey S. Nesterov²

^{1, 2} Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Novosibirsk, Russia

¹ systems1@yandex.ru ✉

² nesterov@biik.ru

Abstract. The article presents findings of manual, semi-automatic, and automatic approaches to generate test questions based on such methods as annotation, keyword extraction, and learning datasets for compiling tests for studying material, along with a description of each method algorithm, examples of generated questions, and their quality assessment. These examples demonstrate the advantages of an algorithm for generating a method using a dataset and a combination of methods, as well as their possible practical application.

Keywords: text questions generation, neural networks, comparison of methods of generation

Funding: the study is conducted in the framework of a State task No. 071-03-2023-001.

For citation: Vasilyev A. A., Nesterov A. S. Applying text questions generation algorithms for automatic test generation. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):17–22. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-17-22.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая экономика требует квалифицированных специалистов и создания цифрового информационного пространства, в том числе в образовательной сфере. В статье рас-

сматриваются способы генерации вопросов для тестов на естественном русском языке, а также некоторые примеры реализаций решений этой задачи с помощью нейросетей, которые можно использовать для автоматизи-

рованной генерации контрольных материалов в виде тестов.

Широкое применение технологий дистанционного обучения поднимает проблему объективной, желательной автоматизированной оценки результатов освоения обучающимися образовательных программ в цифровой образовательной среде. Одним из возможных вариантов решения является использование тестов с большим количеством вопросов для

генерации индивидуальных вариантов. Высокая трудоемкость создания таких тестов существенно ограничивает их применение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

По степени участия человека способы генерации можно разделить на ручные, полуавтоматизированные и автоматизированные (табл. 1) [1, с. 86].

Таблица 1

Способы и методы генерации вопросов

Способы генерации	Методы генерации
Ручной	Параметризованные тесты Единый тест для всех учащихся
Полуавтоматизированный	Аннотирование текста Выделение ключевых слов
Автоматизированный	Применение обученных моделей Использование обученной нейронной сети (датасета)

Примечание: составлено по [1].

В работе исследуются алгоритмы [2, с. 594], позволяющие по тексту – учебному материалу, конспекту лекций и пр., сгенерировать вопросы для тестов [3, с. 7]. Из перечисленных выше методов в практических задачах были рассмотрены три метода генерации вопросов с наименьшей необходимостью ручной доработки результатов: аннотирование текста, выделение ключевых слов и использование датасета [4, с. 1033].

Метод «Выделение ключевых слов» основан на использовании библиотеки *Mystem* для выделения из текста ключевых слов (существительных и глаголов). Для формирования вопроса к найденным ключевым словам добавляется вопросительное слово, которое в свою очередь определяется с помощью искусственной нейронной сети (ИНС), обученной на выборке, содержащей пары «набор ключевых слов – вопросительное слово».

Метод «Выделение ключевых слов с предварительной аннотацией текста» позволяет уменьшить чувствительность предыдущего метода к формированию не соответствующих основному содержанию вопросов из-за наличия в исходном тексте слов, не несущих важной смысловой нагрузки. В данном методе исходный текст разбивается на логические

блоки, в качестве которых принимаются абзацы. Далее для каждого логического блока с помощью библиотеки *Transformers* и модели «*IlyaGusev/mbart_ru_sum_gazeta*» генерируется аннотация, для которой выполняется описанный ранее алгоритм на основе выделения ключевых слов [5, с. 56].

В методе «Использование датасета» формирование вопроса осуществляется без предварительной обработки текста непосредственно с помощью ИНС, реализованной с помощью библиотеки *Scikit-learn*. Составленная вручную обучающая выборка содержит пары «предложение – вопрос». Библиотека *Scikit-learn* обеспечивает использование ИНС типа MLP (*Multilayer Perceptron* – многослойный перцептрон). Для обработки текстовых данных в библиотеке используется метод оценки важности слов в контексте документа *TfidfVectorizer*, основанный на замене слов векторами в многомерном пространстве. Обучающие датасеты в работе были получены путем ручного формирования вопросов для каждого абзаца текстов, найденных в Интернете по заданной тематике [6, с. 317]. Объем датасета составлял 531 пару «абзац – вопрос».

Для сравнения рассматриваемых методов с их помощью было обработано около 70 тыс. символов текста по теме «устройство компьютера», разбитого на 196 абзацев. Для каждого абзаца текста автоматически были сформированы вопросы и проведена оценка возможности их использования в тестах без дополнительной ручной обработки путем присвоения им значений в интервале 0÷1 со следующей интерпретацией: 0 баллов – «неудовлетворительно, вопрос не может быть использован без значительной ручной доработки»; 0,5 балла – «удовлетворительно, вопрос может быть использован после незначительной ручной доработки»; 1 балл – «хо-

рошо, вопрос может быть использован без ручной доработки».

Для каждого из рассмотренных методов рассчитывались средние арифметические значения оценок сгенерированных вопросов по всей тестовой выборке в 196 абзацев. Полученные значения интерпретировались следующим образом: диапазон 0÷0,33 – «неудовлетворительно», 0,33÷0,66 – «удовлетворительно» и 0,66÷1 – «хорошо». В табл. 2 приведены примеры исходных текстовых данных и сгенерированные по ним вопросы.

В следующей табл. 3 приведены значения рассчитанных средних оценок качества генерации вопросов.

Таблица 2

Пример работы методов генерации вопросов по тексту

Выделение ключевых слов/оценка	Аннотирование текста/оценка	Использование датасета/оценка
<i>Исходный текст:</i> Персональный компьютер, ПК (англ. personal computer, PC), ПЭВМ (персональная электронно-вычислительная машина) – однопользовательская (предназначенная для использования одним пользователем) ЭВМ, имеющая эксплуатационные характеристики бытового прибора и универсальные функциональные возможности. ПК может быть стационарным (чаще всего настольным) или портативным (ноутбук, планшет)		
Как компьютер ПК англ.? – 0 Как ПК может быть всего ноутбук планшет? – 0,5	Как компьютер машина предназначенная использования пользователем имеющая характеристики прибора возможности? – 0	Что такое персональный компьютер? – 1
<i>Исходный текст:</i> Жесткий диск – один из самых популярных устройств массового хранения данных. Он позволяет хранить данные даже в том случае, если питание выключено		
Является ли диск устройств хранения данных? – 0,5 Позволяет ли он хранить данные случае питание выключено? – 0	Является ли диск устройств хранения данных? – 0,5	Является ли диск устройством хранения данных? – 1 Позволяет ли диск хранить данные в случае, если питание выключено? – 1
<i>Исходный текст:</i> Компьютер – устройство, которое выполняет логические операции и обработку данных, может использовать устройства ввода и вывода информации на дисплей и обычно включает в себя центральный процессор (CPU) для выполнения операций		
Компьютер устройство выполняет операции обработку данных может использовать устройства ввода вывода информации дисплей включает себя процессор выполнения операций? – 0	Термин компьютер устройство выполняет операции обработку? – 0	Сколько транзисторов содержит процессор? – 0,5
<i>Исходный текст:</i> Центральный процессор компьютера – это чип, покрытый миллиардами крошечных транзисторов, который встраивается в материнскую плату устройства		
Процессор компьютера чип покрытый миллиардами транзисторов встраивается плату устройства? – 0,5	Компьютере процессор чип покрытый миллиардами транзисторов? – 0	Сколько транзисторов содержит процессор? – 1
<i>Исходный текст:</i> Процессор работает в команде с другими компонентами компьютера: памятью, видеокартой и периферийными устройствами		
Процессор работает команде компонентами компьютера памятью видеокартой устройствами? – 0	Обзоре новинок? – 0	Как подключаются другие основные компоненты системы? – 1

Окончание табл. 2

Выделение ключевых слов/оценка	Аннотирование текста/оценка	Использование датасета/оценка
<i>Исходный текст:</i> Изначально термин центральное процессорное устройство описывал специализированную систему элементов, предназначенных для понимания и выполнения машинного кода компьютерных программ, а не только фиксированных логических операций. Начало применения термина и его аббревиатуры по отношению к компьютерным системам было положено в 1960-е гг. Устройство, архитектура и реализация процессоров с тех пор неоднократно менялись. В современных вычислительных системах все функции центрального процессора обычно выполняет одна микросхема высокой степени интеграции – микропроцессор		
Термин устройство описывал систему элементов предназначенных понимания выполнения кода программ фиксированных операций Начало применения термина аббревиатуры отношению системам было положено годы Устройство архитектура реализация процессоров пор менялись системах функции процессора выполняет микросхема степень интеграции микропроцессор? – 0	Чем управляет операционная система (ОС)? – 0	Чем управляет операционная система (ОС)? – 0
<i>Исходный текст:</i> Процессор Intel 80 386 появился в 1985 г. и привнес улучшенный защищенный режим, 32-битную адресацию, позволившую использовать до 4 Гб оперативной памяти и поддержку механизма виртуальной памяти. Эта линейка процессоров построена на регистровой вычислительной модели		
Процессор появился году привнес улучшенный защищённый режим адресацию позволившую использовать Гб памяти поддержку механизма памяти линейка процессоров построена модели? – 0	Расскажите о лазерных принтерах? – 0	Для чего используется основная память ПК? – 0,5
<i>Исходный текст:</i> Способность выполнения нескольких машинных инструкций за один такт процессора путем увеличения числа исполнительных устройств. Появление этой технологии привело к существенному увеличению производительности, в то же время существует определенный предел роста числа исполнительных устройств, при превышении которого производительность практически перестает расти, а исполнительные устройства простаивают. Частичным решением этой проблемы является, например, технология Hyper-threading		
Способность выполнения инструкций такт процессора увеличения числа устройств появление технологии привело увеличению производительности время существует предел роста числа устройств превышении производительность перестает расти устройства простаивают решением проблемы является технология? – 0	Назовите емкость компакт-дисков? – 0	Сохраняет ли оперативная память свое содержание в отсутствии мощности? – 0,5
<i>Исходный текст:</i> В октябре 2004 года Sun Microsystems выпустила двухъядерный процессор UltraSPARC IV, который состоял из двух модифицированных ядер UltraSPARC III. В начале 2005 г. был создан двухъядерный UltraSPARC IV+		
Октябре года выпустила процессор состоял ядер начале был создан? – 0	В каком году они перешли на x86-совместимые процессоры Intel? – 0,5	Из чего обычно изготавливается? – 0
<i>Исходный текст:</i> Изменение компоновки процессоров. Кристалл процессора переместился с внутренней на внешнюю сторону для лучшего отвода тепла к радиатору системы охлаждения		
Изменение компоновки процессоров Кристалл процессора переместился сторону отвода тепла радиатору системы охлаждения? – 0,5	Что может иметь чип процессора? – 0	Что может иметь чип процессора? – 0

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Таблица 3

Оценка качества генерации вопросов

Метод	Среднее значение оценки	Результат интерпретации
Выделение ключевых слов	0,1	неудовлетворительно
Аннотирование текста	0,15	неудовлетворительно
Использование датасета	0,341	удовлетворительно

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из табл. 2–3 следует, что метод «Использование датасета» приводит к результату, требующему меньшей ручной доработки. В эксперименте этот метод использовался для генерации вопросов к существенному объему учебных данных (около 70 тыс. символов текста), для которых было сгенерировано 196 вопросов.

В табл. 2 можно встретить сгенерированные вопросы по темам, не содержащимся в исходных текстах. Сам вопрос выглядит корректно, и его появление связано не с ошибкой

алгоритма, а с недостаточным размером обучающей выборки.

Среднее арифметическое оценки качества вопросов составило 0,341, что по введенной шкале соответствует оценке «удовлетворительно». Полученный результат указывает, что метод «Использование датасета» хотя и может применяться на практике, все же требует заметной ручной фильтрации и доработки сгенерированных вопросов. Была проверена возможность повышения качества формируемых данным методом вопросов путем его комбинации с остальными методами (табл. 4).

Таблица 4

Результаты комбинации методов

Вариант	Среднее значение оценки качества
Напрямую по абзацу текста	0,341
Извлечение ключевых слов из абзаца текста	0,351
Аннотация по абзацу текста	0,220
Извлечение ключевых слов из аннотации	0,251

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Из данных табл. 4 следует, что на используемом учебном материале извлечение ключевых слов приводит к незначительному улучшению результатов. Невысокое среднее значение оценки можно объяснить недостаточным размером/качеством обучающей выборки [7, с. 61] либо наличием каких-либо других проблем ее формирования [8, с. 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из рассмотренных методов наилучшие, но все же требующие дополнительной доработки результаты показал метод «Ис-

пользование датасета». Комбинация методов не привела к существенному росту качества сгенерированных вопросов, но даже в текущем виде данные алгоритмы при условии ряда оговорок могут быть использованы для генерации вопросов. Поскольку проблема автоматизированного формирования контрольных материалов в образовательном процессе обладает очевидной привлекательностью и широкой перспективой использования, исследование подобных алгоритмов необходимо продолжать.

Список источников

1. Кручинин В. В., Кузовкин В. В. Обзор существующих методов автоматической генерации задач с условиями на естественном языке // Компьютерные инструменты в образовании. 2022. № 1. С. 85–96.
2. Посов И. А. Обзор генераторов и методов генерации учебных заданий // Образовательные технологии и общество. 2014. Т. 17, № 4. С. 593–609.
3. Куртасов А. М., Швецов А. Н. Метод автоматизированной генерации контрольно-тестовых заданий из текста учебных материалов // Вестник Череповецкого государственного университета. 2014. № 7. С. 7–11.
4. Тарасенко С. В., Рязанова Н. Ю. Анализ методов автоматической генерации вопросов на естественном языке // Инженерный вестник. 2015. № 12. С. 1032–1037.

References

1. Kruchinin V. V., Kuzovkin V. V. Overview of existing methods for automatic generation of tasks with conditions in natural language. *Kompiuternye instrumenty v obrazovanii*. 2022;(1):85–96. (In Russian).
2. Posov I. A. Obzor generatorov i metodov generatsii uchebnykh zadaniy. *Obrazovatelnye tekhnologii i obshchestvo*. 2014;17(4):593–609. (In Russian).
3. Kurtasov A. M., Shvetsov A. N. Metod avtomatizirovannoi generatsii kontrolno-testovykh zadaniy iz teksta uchebnykh materialov. *Cherepovets State University*. 2014;(7):7–11. (In Russian).
4. Tarasenko S. V., Ryzanova N. Yu. Analiz metodov avtomaticheskoi generatsii voprosov na estestvennom iazyke. *Engineering Bulletin*. 2015;(12):1032–1037. (In Russian).

5. Морозов Д. А., Глазкова А. В., Тютюльников М. А. и др. Генерация ключевых слов для аннотаций русскоязычных научных статей // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Лингвистика и межкультурная коммуникация. 2023. Т. 21, № 1. С. 54–66.
6. Романенко В. В., Аксененко И. О. Обзор технологий автоматизированного создания и публикации тестовых заданий в системах дистанционного обучения // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине : сб. науч. трудов IV Междунар. науч. конф., 5–8 декабря 2017 г., г. Томск. В 2 ч. Ч. 1. Томск : Изд-во ТПУ, 2017. С. 317–321.
7. Парасич А. В., Парасич В. А., Парасич И. В. Формирование обучающей выборки в задачах машинного обучения // Информационно-управляющие системы. 2021. № 4. С. 61–70. DOI 10.31799/1684-8853-2021-4-61-70.
8. Кафтаников И. Л., Парасич А. В. Проблемы формирования обучающей выборки в задачах машинного обучения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2016. Т. 16, № 3. С. 15–24. DOI 10.14529/ctcr160302.
5. Morozov D. A., Glazkova A. V., Tyutyulnikov M. A. et al. Keyphrase generation for abstracts of the Russian-language scientific articles. *NSU Vestnik. Series: Linguistics and Intercultural Communication*. 2023;21(1):54–66. (In Russian).
6. Romanenko V. V., Aksenenko I. O. Review of technologies of automated creation and publication of test tasks in the distance learning systems. In: *Proceedings of the IV International Scientific Conference "Informatsionnye tekhnologii v nauke, upravlenii, sotsialnoi sfere i meditsine"*, December 5–8, 2017, Tomsk. In 2 parts. Pt. 1. Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University; 2017. p. 317–321. (In Russian).
7. Parasich A. V., Parasich V. A., Parasich I. V. Training set formation in machine learning tasks. *Survey. Information and Control Systems*. 2021;(4):61–70. DOI 10.31799/1684-8853-2021-4-61-70. (In Russian).
8. Kaftannikov I. L., Parasich A. V. Problems of training set's formation in machine learning tasks. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2016;16(3):15–24. DOI 10.14529/ctcr160302. (In Russian).

Информация об авторах

А. А. Васильев – преподаватель.

А. С. Нестеров – кандидат технических наук, преподаватель.

Information about the authors

A. A. Vasilyev – Lecturer.

A. S. Nesterov – Candidate of Sciences (Engineering), Lecturer.

Научная статья

УДК 621.396.9:621.37

DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-23-31

О СВЯЗИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ КОДОВ ФРЭНКА С ПОГРЕШНОСТЯМИ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Анатолий Ильич Дёмко

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

dai321@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0747-0294>

Аннотация. Представлены актуальные для развития и оптимизации сложных сигналов результаты исследования влияния амплитудных и фазовых погрешностей формирования радиоимпульсных сигналов на основе кодов Фрэнка на их корреляционные свойства. Полученные результаты могут быть использованы в системах радиолокации и связи.

Ключевые слова: код Фрэнка, сигнальное созвездие, искажения сигнала, периодическая функция неопределенности, боковые лепестки

Для цитирования: Дёмко А. И. О связи корреляционных свойств сигналов на основе кодов Фрэнка с погрешностями их формирования // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 23–31. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-23-31.

Original article

ON RELATION BETWEEN CORRELATION CHARACTERISTICS OF SIGNALS BASED ON THE FRANK CODES AND THEIR FORMATION ERRORS

Anatoly I. Dyomko

Surgut State University, Surgut, Russia

dai321@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0747-0294>

Abstract. The study presents the results of amplitude and phase errors in the formation of radio-impulse signals based on the Frank codes influencing their correlation characteristics, which will be beneficial for the development and optimization of compound signals. The findings obtained can be applied to radar and communication systems.

Keywords: Frank code, constellation diagram, signal distortion, periodical ambiguity function, sidelobes

For citation: Dyomko A. I. On relation between correlation characteristics of signals based on the Frank codes and their formation errors. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):23–31. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-23-31.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных радиотехнических систем тесно связано с поиском новых и исследованием свойств уже известных сигналов. В значительной мере это стимулируется новыми возможностями формирования сигналов на основе широкого использования вычислительных алгоритмов и цифровых схем, при этом даже известные сигналы, ранее не применявшиеся из-за технических ограничений, могут получить второе рождение. В ста-

тье рассматривается влияние погрешностей формирования многофазных сигналов на основе кодов Фрэнка на их корреляционные свойства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Свойства радиотехнических систем во многом определяются используемыми сигналами, которые подразделяются на простые (с близким к единице произведением длительности сигнала T на ширину спектра $\Delta\omega$ – базой

$B = T \cdot \Delta\omega$) и сложные со значением базы много больших единицы [1–4].

Любой сигнал $s(t)$ может быть представлен в тригонометрической:

$$s(t) = S_m \cos \Psi(t) \quad (1)$$

или комплексной форме:

$$\dot{S}(t) = S_m e^{j\Psi(t)}, \quad (2)$$

где S_m – амплитуда сигнала,
 $\Psi(t)$ – текущая фаза сигнала.

$$\Psi(t) = \omega_0 t + \varphi_0, \quad (3)$$

где ω_0 – несущая частота,
 t – текущее время,
 φ_0 – начальная фаза.

Области применения и корреляционные свойства сигналов характеризуются функцией неопределенности (ФН) $\chi(\tau, F)$:

$$\chi(\tau, F) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(t) \cdot \dot{S}^*(t - \tau) e^{j2\pi Ft} dt, \quad (4)$$

где τ – временной сдвиг,
 F – сдвиг по частоте.

Для ограниченного во времени сигнала пределы интегрирования при вычислении ФН определяются длительностью сигнала:

$$\chi(\tau, F) = \int_{-T/2+\tau}^{T/2} \dot{S}(t) \cdot \dot{S}^*(t - \tau) e^{j2\pi Ft} dt, \quad (5)$$

$$0 \leq \tau \leq T.$$

Функцию неопределенности можно определить как для одиночного, так и для периодического (с периодом T) сигнала – периодическую функцию неопределенности (ПФН) $\chi_T(\tau, F)$:

$$\chi_T(\tau, F) = \int_{-T/2}^{-T/2+\tau} \dot{S}(t) \cdot \dot{S}^*(t + T - \tau) e^{j2\pi Ft} dt + \int_{-T/2+\tau}^{T/2} \dot{S}(t) \cdot \dot{S}^*(t - \tau) e^{j2\pi Ft} dt, \quad (6)$$

$$0 \leq \tau \leq T,$$

где первый интеграл учитывает корреляцию левой части периода сигнала с окончанием предыдущего периода задержанного сигнала.

ФН и ПФН имеют максимум в начале ($\tau = 0$, $F = 0$) координат (главный максимум), определяемый энергией сигнала \mathcal{E} . В окрестностях ($\tau \neq 0$, $F \neq 0$) главного максимума (боковые лепестки) значения этих функций уменьшаются. Удобнее для анализа нормированные к энергии ФН и ПФН:

$$\chi'(\tau, F) = \frac{1}{\mathcal{E}} \int_{-T/2+\tau}^{T/2} \dot{S}(t) \cdot \dot{S}^*(t - \tau) e^{j2\pi Ft} dt, \quad (7)$$

$$0 \leq \tau \leq T.$$

$$\chi'_T(\tau, F) = \frac{1}{\mathcal{E}} \int_{-T/2}^{-T/2+\tau} \dot{S}(t) \cdot \dot{S}^*(t + T - \tau) e^{j2\pi Ft} dt + \frac{1}{\mathcal{E}} \int_{-T/2+\tau}^{T/2} \dot{S}(t) \cdot \dot{S}^*(t - \tau) e^{j2\pi Ft} dt, \quad (8)$$

$$0 \leq \tau \leq T.$$

Сложные сигналы разделяются на сигналы с непрерывной модуляцией (например, линейно-частотно-модулированные) и дискретно-кодированные сигналы. В свою очередь дискретно-кодированные сигналы разделяются на кодированные по амплитуде, частоте и фазе. Кодированные по фазе сигналы (фазо-кодированные) разделяются на бинарные ($0/\pi$) и многофазные. Сложный многофазный радиоимпульсный сигнал с изменением начальных фаз φ_{nm} радиоимпульсов в соответствии с кодом Фрэнка [1] является дискретным аналогом сигнала, частота которого изменяется по линейному закону.

$$\varphi_{nm} = \frac{2\pi k_{nm}}{N}, \quad n = 0, 1, N-1; \quad m = 0, 1, N-1, \quad (9)$$

где n – номер столбца,

m – номер строки,

k_{nm} – коэффициенты матрицы Фрэнка (10),

N – число строк (столбцов) матрицы Фрэнка.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & \dots & n & (N-1) \\ 0 & 2 & 4 & \dots & 2 \cdot n & 2(N-1) \\ 0 & 3 & 6 & \dots & 3 \cdot n & 3(N-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & m & m \cdot 2 & \dots & m \cdot n & m \cdot (N-1) \\ 0 & (N-1) & (N-1) \cdot 2 & \dots & (N-1) \cdot n & (N-1)(N-1) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Последовательность коэффициентов k_{nm} образуется считыванием строки за строкой

(или столбец за столбцом) элементов матрицы, при этом число элементов в последовательности $K = N^2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Примечательным свойством многофазного квантованного сложного сигнала на основе кодов Фрэнка является нулевой уровень боковых лепестков (УБЛ) нулевого сечения ПФН $\chi_T(\tau, 0)$.

Единичная (непериодическая) ФН имеет ненулевой, но достаточно низкий уровень боковых лепестков нулевого сечения $\chi(\tau, 0)$.

Сигнальное созвездие сигналов на основе кодов Фрэнка содержит N точек, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга по окружности с центром в начале координат. На рис. 1 изображено сигнальное созвездие многофазного сигнала на основе кода Фрэнка для последовательности из 64 элементов ($N = 8$).

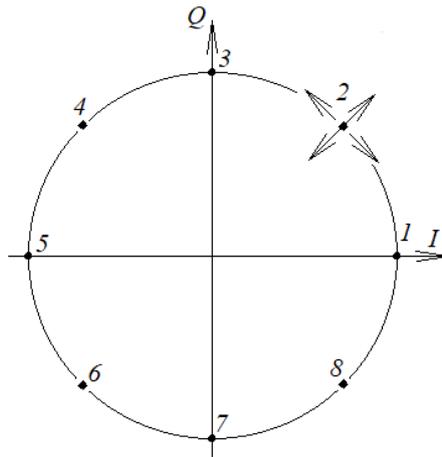


Рис. 1. Сигнальное созвездие сигнала на основе кодов Фрэнка для последовательности из 64 элементов ($N = 8$)
Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Формирование сигналов на основе кодов Фрэнка производится с помощью управляемого фазовращателя (на который подается управляющее фазой напряжение $U_{упр}$) либо на основе квадратурной схемы (с предварительным приведением значений фазы к шкале $0-360^\circ$, учитывая периодичность тригонометрических функций). В любом случае, формирователи содержат аналоговые элементы, что приводит к погрешностям формирования и изменению сигнального созвездия: фазовые ошибки формирования приводят к смещению точек сигнального созвездия по окружности, амплитудные ошибки – к смещению по радиусу [5–10].

Для определения требований к необходимой точности формирования сигналов на основе кодов Фрэнка проведено исследование влияния ошибок формирования на корреляционные свойства таких сигналов.

Предлагается модель многофазного радиопульсного сигнала, допускающая ампли-

тудные и фазовые погрешности по отношению к идеальному сигналу, сформированному на основе кодов Фрэнка. Радиопульс модели с параметрами n и m матрицы Фрэнка описывается выражением:

$$s(t) = S_m \left[1 + \frac{k_1 \Phi_{nm}}{2\pi} \right] \exp j[\omega_0 t] \times \exp j \left\{ \left[1 + k_1 + k_2 \sin \left(\frac{\Phi_{nm}}{2} \right) + k_2 \sin \Phi_{nm} \right] \Phi_{nm} \right\}, \quad (11)$$

$$\Phi_{nm} = \varphi_{nm} - 2\pi E \left[\frac{\varphi_{nm}}{2\pi} \right],$$

где $E[x]$ – целая часть числа x ,

φ_{nm} – фаза кода Фрэнка, приведенная к шкале $0 - 2\pi$,

k_1 – коэффициент масштаба фазы, выраженный в относительных единицах изменения наклона фазовой характеристики модулятора (положительный при увеличении максимального значения фазы относительно 2π и отрицательный при уменьшении),

k_2 – коэффициент односторонней нелинейности фазы, выраженный в относительных единицах изменения степени нелинейности фазовой характеристики модулятора (положительный при выпуклой фазовой характеристике модулятора и отрицательный при вогнутой),

k_3 – коэффициент гармонической нелинейности фазы, выраженный в относительных единицах изменения степени дополнительной синусоидальной составляющей фазовой характеристики модулятора (положительный при синусоиде с нулевой фазой и отрицательный при фазовом сдвиге π),

k_4 – коэффициент амплитудной погрешности формирования (паразитная амплитуд-

ная модуляция (ПАМ) при изменении фазового сдвига), выраженный в относительных единицах (положительный при увеличении амплитуды относительно номинального значения и отрицательный при уменьшении амплитуды).

Амплитудная погрешность формирования приводит к тому, что амплитуды радиоимпульсов не являются постоянными, а изменяются от радиоимпульса к радиоимпульсу. Различные виды фазовых погрешностей приводят к тому, что начальная фаза текущего радиоимпульса отличается от значения, определяемого кодом Фрэнка (9).

Рис. 2 поясняет смысл коэффициентов погрешностей фазы в модели (11).

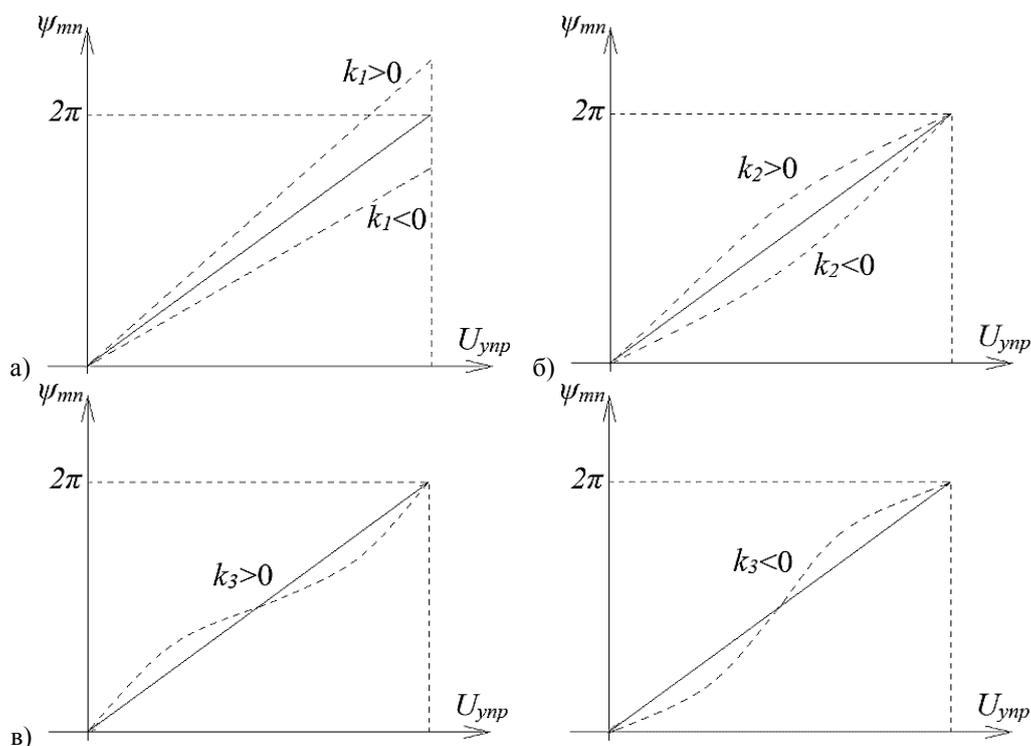


Рис. 2. Модели погрешностей задания фазы:

- а) погрешность масштаба фазы; б) погрешность односторонней нелинейности фазы;
- в) погрешности гармонической нелинейности фазы

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 3 представлено нулевое сечение нормированной ПФН ($F = 0$) сигнала на основе кодов Фрэнка ($N = 8$) при погрешности задания фазы $k_1 = 12,5\%$ (максимальное значение фазы отличается на 45° от 360°). Сечение содержит главный максимум при нулевом сдвиге ($\tau = 0$) и боковые лепестки с макси-

мальным значением $23,01$ дБ (при отсутствии искажений значение максимального M_{\max} УБЛ ПФН, рассчитанное в MATLAB, составило минус 265 дБ из-за округлений при выполнении большого числа операций с комплексными числами).

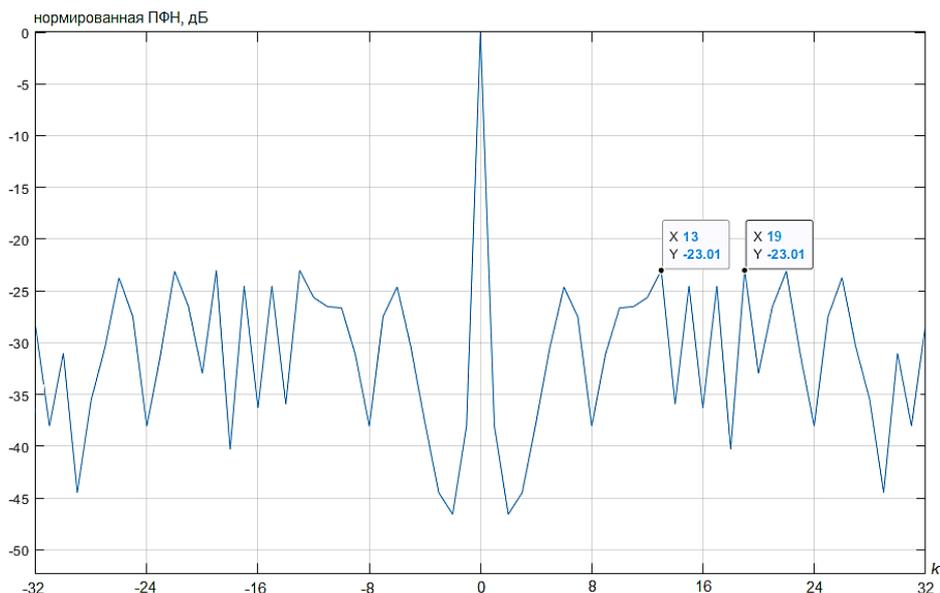


Рис. 3. Нулевое сечение периодической функции неопределенности кодов Фрэнка ($N = 8$) при погрешности задания фазы $k_1 = 12,5\%$ (по горизонтали отложен временной сдвиг в единицах длительности радиопульсов)

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 4 представлены полученные в процессе моделирования зависимости максимального значения M_{\max} УБЛ нулевого сечения

ПФН ($F = 0$) последовательностей на основе кодов Фрэнка при влиянии фазы на амплитуду радиопульсов.

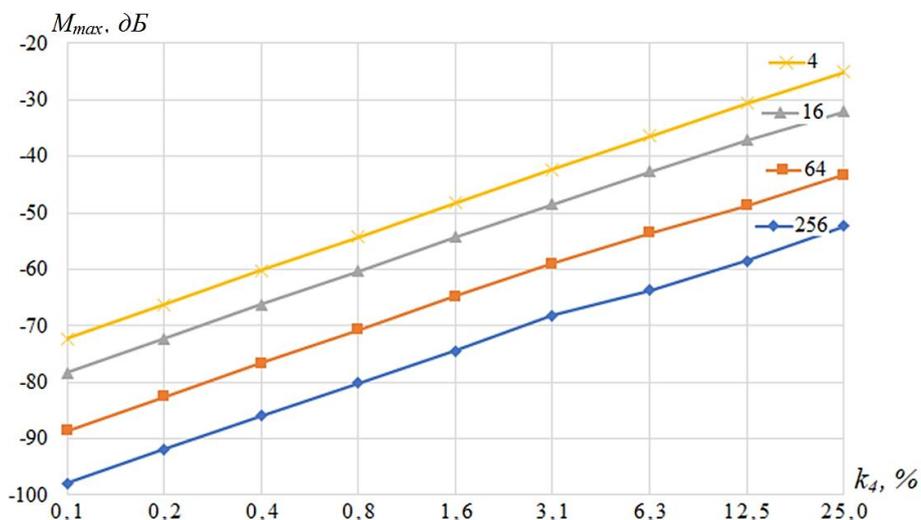


Рис. 4. Влияние погрешности задания амплитуды на максимальный уровень боковых лепестков периодической функции неопределенности кодов Фрэнка при разных значениях N

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

ПАМ, возникающая при различных способах формирования многофазного сигнала на основе кодов Фрэнка, увеличивает максимальный УБЛ в зависимости от параметра N . Наблюдается линейное увеличение боковых лепестков с ростом глубины ПАМ, причем

для последовательности с большим числом элементов это проявляется в меньшей степени. Эмпирическая формула для максимального уровня боковых лепестков M_{\max} при ПАМ имеет вид:

$$M_{\max} \cong 6 - 201gN + 18,51gk_4 + 41g\left(\frac{N}{256}\right), \quad (12)$$

дБ.

С учетом того, что ПАМ может быть устранена (ослаблена) простым двухсторонним ограничением до величины 3–6 %, влиянием подобного рода неточностей формирования можно пренебречь, УБЛ не превышает –42 дБ и –68 дБ для последовательностей из 16 и 65 536 элементов соответственно ($N = 4; 256$).

На рис. 5–7 представлено влияние неточности формирования фазы на максимальный УБЛ. На рис. 4 показано влияние неточности задания фазы (рис. 2а) на максимальный УБЛ (неточность приводит к отличию максимального значения фазы от 2π в большую или меньшую сторону). Степень влияния более сложная, по сравнению с ПАМ, причем в среднем максимальный УБЛ, как минимум, на 10 дБ больше.

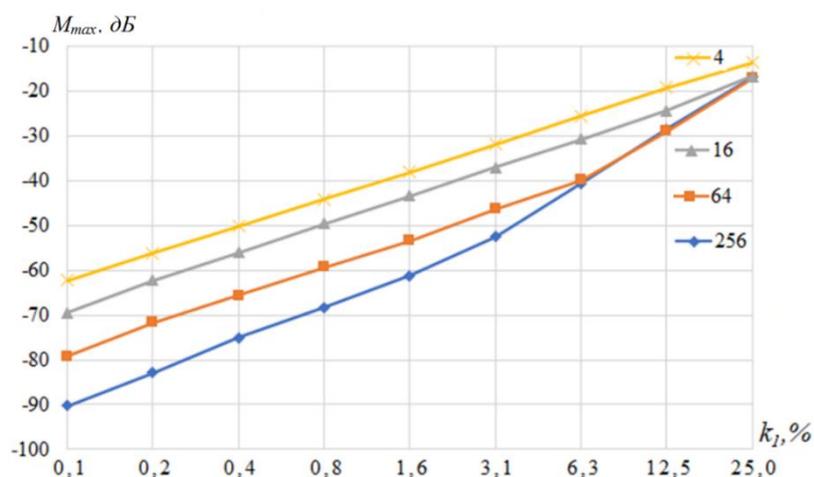


Рис. 5. Влияние неточности задания фазы на максимальный уровень боковых лепестков периодической функции неопределенности кодов Фрэнка при разных значениях N

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 6 показано влияние нелинейности задания фазы в виде одной полуволны (рис. 2б) гармонической функции на УБЛ (максимальная величина УБЛ незначительно зависит от кон-

кретного вида нелинейности: выгнутости или вогнутости). При этом максимальное значение фазы многофазного сигнала равно 2π .

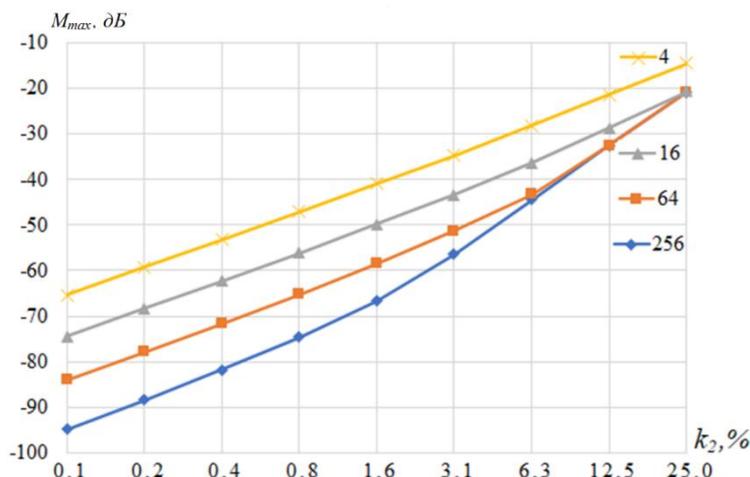


Рис. 6. Влияние квадратичной нелинейности задания фазы на максимальный уровень боковых лепестков периодической функции неопределенности кодов Фрэнка при разных значениях N

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 7 показано влияние гармонической (рис. 2в) нелинейности задания фазы на УБЛ (максимальная величина УБЛ незначительно зависит от значения начальной фазы этой не-

линейности: 0 или π). Аналогично предыдущему случаю максимальное значение фазы многофазного сигнала равно 2π .

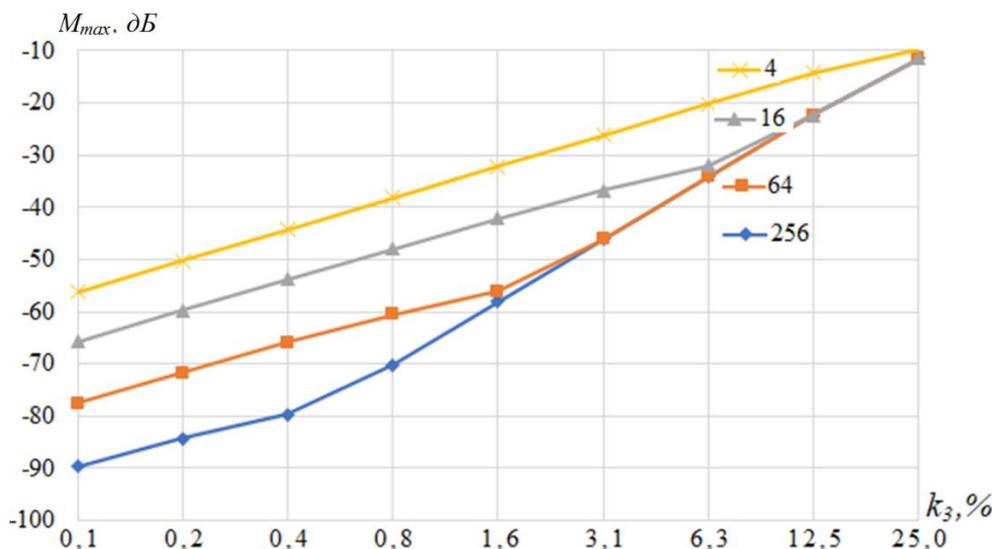


Рис. 7. Влияние гармонической нелинейности задания фазы на максимальный уровень боковых лепестков периодической функции неопределенности кодов Фрэнка при разных значениях N
Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

В общем случае, максимальный уровень боковых лепестков ПФН для сигналов на основе кодов Фрэнка с заданным числом элементов определяется модулем значения коэффициента погрешности фазы k_i , незначительно отличаясь (разброс не более 6 дБ) для разных видов и знака нелинейностей (k_1, k_2 или k_3). Анализ зависимостей определяет область критерия величины погрешностей: $k_i N \approx 1$.

При небольшой величине погрешности ($k_i N < 1$) влияние погрешностей формирования проявляется в пропорциональной зависимости:

$$\frac{dM_{max}}{dN} \cong -4,5 \text{ дБ/окт}, \quad \frac{dM_{max}}{dk} \cong 3 \text{ дБ/окт}.$$

При большой величине погрешности ($k_i N > 1$) закономерности несколько изменяются:

$$\left| \frac{dM_{max}}{dN} \right| < 4,5 \text{ дБ/окт}, \quad \frac{dM_{max}}{dk} > 3 \text{ дБ/окт}.$$

Представленные на графиках результаты моделирования помогают формулировать

требования к формирователям сигналов на основе кодов Фрэнка с тем, чтобы оценить условия технической реализации и требования к точности и стабильности подобных устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многофазные сигналы на основе кода Фрэнка имеют нулевой уровень боковых лепестков нулевого сечения периодической функции неопределенности.

Сигнальное созвездие сигналов на основе кода Фрэнка представляет собой равномерно распределенные по единичной окружности N точек.

Погрешности формирования многофазных сигналов на основе кода Фрэнка приводят к смещению точек сигнального созвездия относительно точек, равномерно распределенных по единичной окружности, отчего появляются боковые лепестки нулевого сечения периодической функции неопределенности.

Исследование влияния амплитудных и фазовых погрешностей формирования многофазных

сигналов на основе кода Фрэнка выявило степень влияния погрешностей формирования на уровень боковых лепестков нулевого сечения периодической функции неопределенности.

Амплитудные погрешности формирования в небольшой степени влияют на боковые лепестки (при погрешности формирования 3,1 % УБЛ не превышает –42 дБ и –68 дБ для последовательностей с параметром $N = 4$ и 256 соответственно).

Фазовые погрешности формирования в большей степени влияют на боковые ле-

пестки (при погрешности формирования 3,1 % УБЛ не превышает –38 дБ и –61 дБ для последовательностей с параметром $N = 4$ и 256 соответственно). УБЛ ПФН определяется, в основном, модулем значения коэффициента погрешности фазы k_i , незначительно отличаясь для разных видов и знака нелинейностей.

Представленные в статье результаты могут быть использованы в радиолокационных и связанных радиотехнических системах.

Список источников

1. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы / под ред. В. С. Кельзона ; пер. с англ. М. : Советское радио, 1971. 568 с.
2. Ипанов Р. Н. Импульсные полифазные сигналы с нулевой зоной автокорреляции и алгоритм их сжатия // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65, № 6. С. 578–586. DOI 10.31857/S0033849420060121.
3. Саранча А. М. Увеличение дальности помехоподавления в импульсно-доплеровской радиолокации // Научные дискуссии в эпоху мировой нестабильности: пути совершенствования : материалы IV междунар. науч.-практич. конф., 30 июня 2022 г., г. Ростов-на-Дону. В 2 ч. Ч. 1. Ростов н/Д : Манускрипт, 2022. С. 341–343.
4. Коврегин В. Н., Коврегина Г. М., Мурзаев А. С. Метод обнаружения/идентификации нескольких малоскоростных целей со сложным спектром в импульсно-доплеровских радарх с ЛЧМ-излучением // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : материалы XXV Междунар. науч. конф., 30 мая 2022 г., г. Санкт-Петербург. Т. 2. СПб. : Санкт-Петербург. гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2022. С. 135–139.
5. Дёмко А. И., Семенов О. Ю. Формирование многофазных сигналов с квантованием фазы // Вестник кибернетики. 2022. № 2. С. 39–45.
6. Sheikh I. A., Pannu N. K. Review of polyphase filtering technique in signal processing. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*. 2018;7(12):213–221.
7. Жукова И. Н. Синтез квазинепрерывных сигналов методом композиции ансамбля многофазных сигналов // Вестник Новгородского государственного университета. 2014. № 81. С. 17–20.
8. Рябов И. В. Цифровой синтез прецизионных сигналов : моногр. Йошкар-Ола : Марийск. гос. техн. ун-т, 2005. 150 с.
9. Быстров Н. Е., Жукова И. Н., Чеботарев С. Д. Синтез сложных сигналов с квазинепрерывным энергетическим спектром // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2012. № 2. С. 37–42.

References

1. Cook C. E., Bernfeld M. Radar signals. An introduction to theory and application. Kelzon V. S., editor. Moscow: Sovetskoe radio; 1971. 568 p. (In Russian).
2. Ipanov R. N. Pulsed polyphase signals with a zero auto-correlation zone and an algorithm for their compression. *Radiotekhnika i elektronika*. 2020;65(6):578–586. DOI 10.31857/S0033849420060121. (In Russian).
3. Sarancha A. M. Increased range of interference cancellation in pulse-Doppler radar. In: *Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference “Scientific discussions in the era of global instability: Ways to improve”*, June 30, 2022, Rostov-on-Don. In 2 parts. Pt. 1. Rostov-on-Don: Manuscript Publishing House; 2022. p. 341–343. (In Russian).
4. Kovregin V. N., Kovregina G. M., Murzaev A. S. Method for detection/identification of several low-speed targets with a complex spectrum in pulse-Doppler radars with chirp radiation. In: *Proceedings of the XXV International Scientific Conference “Wave electronics and its application in information and telecommunication systems”*, May 30, 2022, Saint Petersburg. Vol. 2. St. Petersburg: Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; 2022. p. 135–139. (In Russian).
5. Dyomko A. I., Semenov O. Yu. Generating multiphase signals with phase quantization. *Proceedings in Cybernetics*. 2022;(2):39–45. (In Russian).
6. Sheikh I. A., Pannu N. K. Review of polyphase filtering technique in signal processing. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*. 2018;7(12):213–221.
7. Zhukova I. N. Quasi-continuous signals synthesis using the method of multiphase signals ensemble composition. *Vestnik NovSU*. 2014;(81):17–20. (In Russian).
8. Ryabov I. V. Tsifrovoy sintez pretsizionnykh signalov. Monograph. Yoshkar-Ola: Mari State Technical University; 2005. 150 p. (In Russian).
9. Bystrov N. E., Zhukova I. N., Chebotarev S. D. Synthesis of wideband signals with quasicontinuous energy spectrum. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2012;(2):37–42. (In Russian).

10. Леухин А. Н., Парсаев Н. В. Бесконечные множества фазокодированных последовательностей с одноуровневой периодической автокорреляционной функцией // Радиотехника. 2009. № 12. С. 6–11.
10. Leukhin A. N., Parsaev N. V. Beskonechnye mnozhestva fazokodirovannykh posledovatelnoy s odnourovnevoi periodicheskoi avtokorrelatsionnoi funktsiei. *Radiotekhnika*. 2009;(12):6–11. (In Russian).

Информация об авторе

А. И. Дёмко – кандидат технических наук, доцент, почетный работник высшего образования РФ.

Information about the author

A. I. Dyomko – Candidate of Sciences (Engineering), Docent, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation.

Научная статья
УДК 004.94:519.876.5
DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-32-42

МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Ольга Александровна Ковалева¹, Алина Борисовна Саплина^{2✉},
Сергей Владимирович Ковалев³, Михаил Юрьевич Сидляр⁴, Илья Сергеевич Казарин⁵
^{1, 2, 3, 4, 5} Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина, Тамбов, Россия
¹ solomina-oa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0735-6205>
² sapab23@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0000-3197-9176>
³ sseedd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5961-7561>
⁴ m1kmikl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5908-3400>
⁵ zar7q@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5369-6986>

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена проблемами, связанными со стремительным развитием городской среды и поиском способов для их оптимального решения посредством анализа и прогнозирования различного рода ситуаций при реализации проектов модернизации городской инфраструктуры. Предложена модель, предназначенная для реализации мультиагентного подхода и анализа динамических закономерностей развития городской среды с учетом индивидуальных свойств объектов системы и правил их взаимодействия. Описаны основные допущения модели. Проведены вычислительные эксперименты по изучению динамических характеристик городской среды, предложены рекомендации по их улучшению.

Ключевые слова: мультиагентное моделирование, городская среда, имитационная модель

Для цитирования: Ковалева О. А., Саплина А. Б., Ковалев С. В., Сидляр М. Ю., Казарин И. С. Мультиагентное моделирование динамики развития городской среды // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 32–42. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-32-42.

Original article

AGENT-BASED MODELING FOR URBAN DEVELOPMENT DYNAMICS

Olga A. Kovaleva¹, Alina B. Saplina^{2✉}, Sergey V. Kovalev³,
Mikhail Yu. Sidlyar⁴, Ilya S. Kazarin⁵
^{1, 2, 3, 4, 5} Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia
¹ solomina-oa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0735-6205>
² sapab23@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0000-3197-9176>
³ sseedd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5961-7561>
⁴ m1kmikl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5908-3400>
⁵ zar7q@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5369-6986>

Abstract. The relevance of the study is demonstrated through the issues of rapid urban development and search for optimal approaches to settle the issues using an analysis and forecasting of various cases arising when implementing designs for urban development. A model is proposed to implement the agent-based approach and analyze the dynamic urban development patterns according to the individual properties of system objects and rules for their cooperation. The allowance for the basic model is described. Simulation experiments are conducted to investigate the dynamic urban properties and recommendations are proposed to upgrade them.

Keywords: agent-based modeling, urban environment, simulation model

For citation: Kovaleva O. A., Saplina A. B., Kovalev S. V., Sidlyar M. Yu., Kazarin I. S. Agent-based modeling for urban development dynamics. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):32–42. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-32-42.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с постоянной необходимостью принятия администрацией муниципального образования (МО) различного рода управленческих решений, направленных в основном на модернизацию и развитие инфраструктуры города, возникает потребность применения автоматизированных систем поддержки принятия решений (СППР). Основанная на мультиагентной модели МО, СППР может быть использована как инструмент для комплексного анализа и прогнозирования развития ситуации в городе, для оценки рисков реализации того или иного проекта, а также его воздействия на качество жизни горожан.

Общих математических формул для описания развития такой сложной системы, как МО, пока не найдено, поэтому его возможно прогнозировать лишь путем компьютерной имитации.

В большинстве разработанных моделей изучения тенденций развития городов используется агентное моделирование, основанное на разных критериях – с акцентом либо на ландшафт, либо на социальный аспект.

В работе [1] рассматривается процесс урбанизации в Бхопале, известном индийском городе первого уровня, где описаны изменения городского пространства за последние четыре десятилетия и визуализации будущего роста в 2018 и 2022 гг. За основу взят анализ тенденции развития города в период 1977–2014 гг. Изучение динамики городской морфологии осуществлялось посредством анализа данных дистанционного зондирования с пространственными метриками, градиентами плотности, а также с помощью модели КА-Марков, которая объединяет клеточные автоматы и цепь Маркова.

В статье [2] представлена имитационная модель развития городов и расселения студентов в районе Ватерлоо. В NetLogo модель была создана с использованием трех растровых слоев: близость к городку Университета Уотер, близость к продуктовым магазинам и близость к остановкам.

Работа группы колумбийских ученых посвящена агентно-ориентированному моделированию планирования городской среды на основе потребностей человека [3]. Авторы утверждают, что морфологию и судьбу города

определяет ряд критериев: экологическая среда, жилое и архитектурное пространство и история человеческих взаимоотношений. Города представляют собой сложные системы, включающие в себя элементы различных типов, такие как природные объекты, технические артефакты, человеческие акторы и социальные сущности, включая правила и законы, регулирующие их поведение.

В работе [4] описаны результаты агентного моделирования развития городского землепользования. Модель оснащена новыми методами для моделирования перемещений агентов и конкуренции между ними.

В статье [5] представлено агентное моделирование роста городов на примере Стамбула. Результат моделирования сравнивается с существующей картой плотности и разрастания Стамбула и возможностью дальнейших исследований.

В работе [6] предложенная модель основана на использовании связи между клеточными и векторными агентами, которые позволили учесть пространственное измерение городских систем.

В статье [7] используется подход геомоделирования, сочетающий агентное моделирование с многокритериальным анализом (multi-criteria analysis – MCA). Для моделирования основных детерминант, контролирующих городское развитие, определены три группы агентов: агенты-застройщики, правительственные агенты и резиденты.

Таким образом, разработка высокодетализированных, высокодинамичных и пространственно явных моделей для адаптивного городского планирования является актуальной задачей.

Цель – анализ динамических закономерностей развития муниципальных образований города посредством разработки модели, задачей которой является реализация мультиагентного подхода, позволяющего учитывать индивидуальные свойства объектов, формирующих систему, и правила их взаимодействия с помощью добавления определенных наборов шаблонов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать основные допущения и саму модель развития городских муниципальных

образований, предназначенную для реализации мультиагентного подхода.

2. Провести вычислительные эксперименты по изучению динамических характеристик городской среды.

3. Разработать практические рекомендации по улучшению характеристик развития городской среды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Любой город может быть условно разделен на несколько основных зон, каждая из которых обладает определенными характери-

стиками с точки зрения наличия жилья, бизнеса и качества жизни.

Модель имеет два основных типа агентов: житель (гражданин) и предприятие (фирмы или компании), на котором имеются рабочие места. Агент-житель является центральной частью этой модели, потому что именно его решения о местоположении жилья, месте работы и виде транспорта изменят поведение рынка жилья и транспортной системы. Упрощенная схема общей структуры модели дана на рис. 1.



Рис. 1. Общая структура модели

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

В начале моделирования агент-житель, являющийся ключевым элементом модели, распределяется в среде случайным образом. В каждом районе заселено около 70 % жилой площади, следовательно, существует дополнительная возможность переселения. Возраст агента-жителя – от 20 до 80 лет, выбран случайным образом из равномерного распределения с исключением в процессе моделирования жителей-агентов, не участвующих активно в социальной и производственной сфере. 75 %-я вероятность того, что у каждого агента-жителя есть автомобиль, также сгенерирована случайным образом. Работа назначена из доступных рабочих мест для трудоустройства у агента-предприятия. Но поскольку это начальный момент симуляции, то с наибольшей вероят-

стью место работы будет выбрано в зоне проживания (30 %). Это не означает, что 30 % являются постоянной величиной, которая поддерживается на протяжении всего моделирования. Как и при любом моделировании на первых временных шагах модель будет сходиться к более стабильному состоянию. Баланс каждого агента-жителя рассчитывается в конце каждого месяца на основе размера текущего банковского счета и чистого дохода за прошедший месяц («зарплата – расходы»).

Поведение каждого агента-жителя контролируется диаграммой состояний (рис. 2), в которой переходы соответствуют состоянию агента-жителя и внешним условиям в его окружении.

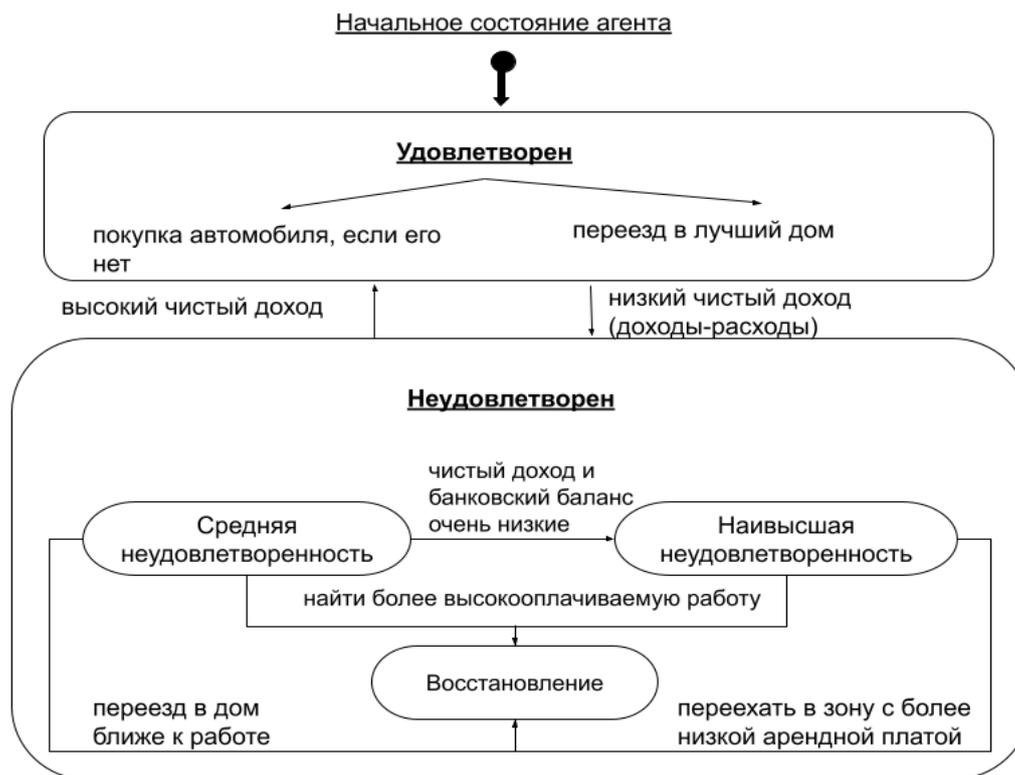


Рис. 2. Диаграмма состояний агента-жителя

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

Как видно из рис. 2, агент-житель имеет два основных состояния: «удовлетворен» и «неудовлетворен». Изначально агент-житель находится в состоянии «удовлетворен», и в этом состоянии рассматривает возможность покупки автомобиля или переезда в более комфортное жилье и лучшую зону города. Эти два события происходят только с определенной вероятностью: если у агента-жителя есть автомобиль, то он не планирует покупать еще один, и переезд в зону с жильем высокого качества происходит с вероятностью 70 %, а с оставшейся 30 %-й вероятностью – в зону, где жилья в настоящее время больше и дешевле.

Этот процесс перезапускается, как только агент-житель, находившийся в состоянии «неудовлетворен», возвращается в состояние «удовлетворен».

Удовлетворенность агента-жителя зависит от чистого дохода, т. е. разницы между всеми доходами и расходами на жилье и транспорт без учета средств, имеющихся на банковском счете. Когда чистый месячный доход опустится ниже 90 тыс. руб., агент-житель перейдет из состояния «удовлетворен» в состояние

«неудовлетворен». Это также может произойти, если его время в пути до работы (в обоих направлениях) превышает 30 минут либо отсутствует возможность использования транспортных средств. Чтобы вернуться к состоянию «удовлетворен», необходимо отменить только что упомянутые три условия: доход выше 90 тыс. руб., возможность использования транспорта и затраты времени до работы менее 30 мин.

Если доход еще ниже (менее 33,5 тыс. руб.), или баланс истощен (сбережения в банке менее 33,5 тыс. руб.), или время в пути превышает 48 минут (0,8 часа), или у агента-жителя отсутствует возможность использования транспортных средств, происходит дальнейший переход в состояние «средняя неудовлетворенность» или «наивысшая неудовлетворенность». Оба эти состояния, относящиеся к состоянию «неудовлетворен», в целом можно изменить переездом в зону с более дешевым жильем, переездом в жилье поблизости от работы, либо поиском работы с более высокой оплатой.

Агент-житель в состоянии «средняя неудовлетворенность» будет принимать решение

об изменении условий жизни в срок от 60 до 90 дней (значение генерируется случайным образом), а вероятность переезда, нахождения лучшего жилья и высокооплачиваемой работы составляет 50 %. С 50 %-й вероятностью агент-житель рассматривает либо возможность переезда в зону, арендная плата в которой дешевле (зона выбирается случайным образом из трех самых дешевых зон, имеющих меньшую стоимость), либо более низких транспортных расходов (вероятность 25 %). Сокращение затрат всегда осуществляется за счет выбора одной зоны, поэтому для этой цели не используется модель дискретного выбора. Если зона выбрана из-за более низкой арендной платы, вероятна возможность роста транспортных расходов и, наоборот, зона, выбранная из-за более низких транспортных расходов, может иметь более высокую арендную плату. Если улучшение недоступно, диаграмма состояния будет циклически переключаться между восстановлением состояния и состоянием «средняя неудовлетворенность».

Агент-житель, находящийся в состоянии «наивысшая неудовлетворенность», избавится от своего автомобиля и останется в этом состоянии от 10 до 60 дней, с поиском в дальнейшем лучшей работы, более дешевого жилья либо переезда в зону рядом с работой.

Выбор вида транспорта ежедневно осуществляется в зависимости от имеющихся транспортных условий. Модель выбора вида транспорта, используемая для принятия решения о поездке, представляет собой простую логическую модель, которая не предполагает корреляции между альтернативами.

Модель имеет следующие две функции полезности (1) и (2) для легкового (личного) (ЛТ) и общественного транспорта (ОТ):

$$ЛТ = 5 - 0,5 \times C_{\text{топлива}} - 0,07 \times t_{ЛТ} \quad (1)$$

$$ОТ = -0,5 \times C_{\text{билета}} - 0,055 \times t_{ОТ} - 0,08 \times t_{\text{ср. ожидания}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{топлива}}$ – стоимость топлива в денежных единицах (руб.) в день;

$t_{ЛТ}$ – время в пути в минутах по маршруту (учитывается длина маршрута, скорость и зазоры на дорогах);

$C_{\text{билета}}$ – стоимость билета в рублях в общественном транспорте;

$t_{ОТ}$ – время в пути в минутах, полученное по маршруту при средней скорости ОТ;

$t_{\text{ср. ожидания}}$ – среднее время ожидания в минутах для ОТ.

Наблюдая за функциями, можно увидеть, что существует предпочтение использования личного автомобиля по сравнению с общественным транспортом, потому что альтернативный удельный коэффициент, который является частью полезности автомобиля, положителен, что дает некоторую дополнительную полезность. Переменные в функциях полезности – это стандартный результат многих моделей спроса, применяемых в аналогичных исследованиях.

Логическая модель, которая используется для вычисления вероятностей выбора каждого из двух режимов, рассчитывается в соответствии со следующим выражением (3):

$$P(\text{транспорт}) = \frac{e^{ЛТ}}{e^{ЛТ} + e^{ОТ}}. \quad (3)$$

Затем выбирается режим в соответствии с вероятностями путем розыгрыша случайного числа (модель Монте – Карло). В случае, если у агента-жителя нет возможности использовать собственный автомобиль (все пути заблокированы), им будет выбран общественный транспорт (при условии наличия пропускной его способности), в противном случае агент-житель будет вынужден добираться из дома до работы и обратно, затрачивая много времени, что приведет его к состоянию «неудовлетворен». Когда транспортное средство выбрано, время в пути обновляется согласно упрощенной функции (4):

$$t_{\text{транспорт}} = 0,05 + \frac{L_{П}}{V_{П}} + 0,06 \times \frac{n_{\text{тр.п}}}{N_{\text{транспорт}}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{транспорт}}$ – время в пути в часах;

$L_{П}$ – длина пути в километрах;

$n_{\text{(тр.п)}}$ – количество машин на пути;

$N_{\text{транспорт}}$ – вместимость транспортных средств;

$V_{П}$ – ограничение скорости на пути в км/ч.

Для моделирования демографической динамики в конце каждого года агентам-жителям прибавляется один год, вследствие чего:

- появляется новый активный агент-житель 20-летнего возраста со следующими характеристиками: проживающий в самом дешевом жилье, без собственного автомобиля и в поиске работы в его либо в других зонах;

- для каждого агента-жителя старше 70 лет возрастает вероятность выбытия из активной социальной и производственной сферы.

Это означает, что количество агентов-жителей в модели никогда не изменится, это помогает анализировать результаты модели.

Агенты-предприятия имеют определенный набор свойств, таких как количество рабочих мест, размер выплачиваемой заработной платы. Их поведение определяется с точки зрения ежемесячных показателей стабильности, снижения или повышения. Если они развиваются, то пространственно передислоцируются в зоны с более высокой арендной платой, или если их активность снижается – в районы с более низкой арендной платой (на рис. 3 показана диаграмма состояний контроля агента-предприятия).



Рис. 3. Диаграмма состояний агента-предприятия

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

Переходы между различными состояниями агента-предприятия не зависят от экономики региона. По умолчанию, агент-предприятие находится в состоянии «Работает» и каждый год повышение заработной платы будет обновляться на 1,5 %. Существует вероятность задержки роста или снижения активности агента-предприятия. Через 80 итераций агент-предприятие может перейти в состояние «Развивается» с возможностью увеличения числа рабочих мест и перемещения в более перспективную зону. Через 30 итераций агент-предприятие повысит заработную плату на 1,5 % и увеличит количество рабочих мест на 10. При очередном переходе агента-предприятия в состояние «Работает» снова начинается от-

счет 80 итераций для возвращения его в состояние «Работает». Из этого состояния также возможен переход в состояние «Реорганизация» с процессом, обратным росту, и вероятностью: (1) уменьшения количества рабочих мест, увольнения самых низкооплачиваемых сотрудников и снижение зарплаты на 2 %; (2) передислокации в одну из зон с более низкой арендной платой (рис. 3). Если агент-предприятие ликвидируется (0 рабочих мест), тогда в диаграмме появляется новый агент-предприятие с 10 сотрудниками в зоне с самой низкой арендной платой.

В начале моделирования все агенты-предприятия генерируются с распределением их в каждой зоне до 60 % и соответствующей

этой зоне арендной платой. Максимальное количество рабочих мест в начале симуляции одинаково для всех агентов-предприятий, т. е. 6 агентов-жителей. В начале симуляции трудоустройство агента-жителя возможно только при наличии вакансий у агента-предприятия. Заработная плата агента-жителя генерируется случайным образом для всех агентов-предприятий в начале симуляции и каждый раз, когда нанимается новый агент-житель.

Как указано выше, город в модели разделен на зоны, каждая из которых имеет следующие характеристики: ограниченная максимальная численность агентов-жителей; ограниченное максимальное количество агентов-предприятий; качество и объем жилья и общая привлекательность зоны (оценивается от 0 до 1, где 1 – наивысшее качество); арендная плата для каждого агента-жителя и каждого агента-предприятия в зависимости от зоны.

В представленном городе есть две транспортные сети: личный автомобиль и общественный транспорт. Это очень упрощенные сети, в которых автомобильная сеть более детализирована и представляет информацию о топологии, которая позволяет вычислять кратчайшие пути, поэтому существует более одного выбора маршрута при заторах на дорогах посредством запуска алгоритма Дейкстры для каждой внутригородской зоны (с учетом уже имеющихся маршрутов). Сеть обще-

ственного транспорта представляет собой полный граф, соединяющий все зоны. Если агент-житель работает и живет в одном районе, предполагается, что он добирается до места работы пешком. Транспортные параметры, которые можно задавать в модели: стоимость билетов в общественном транспорте, стоимость топлива и средняя скорость транспортных средств. Эти параметры можно изменять, чтобы наблюдать их влияние на динамику городской среды. В модели рассматриваются только ежедневные поездки агентов-жителей на работу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для реализации модели динамики развития городской среды была выбрана платформа имитационного моделирования AnyLogic [8].

Размер синтетической популяции в экспериментах составляет 10 600 жителей. Увеличение количества жителей потребует большего объема памяти и значительно увеличит время вычислений. В качестве объекта моделирования выбран город Магадан. Для запуска модели сначала необходимо задать несколько начальных значений для каждого района (зоны) (рис. 4). Центр города отличается высоким качеством жизни, большим количеством предприятий, но очень низким объемом жилья. Район Пионерный имеет самое высокое качество жилья, Марчеканский район – самое низкое качество жилья.

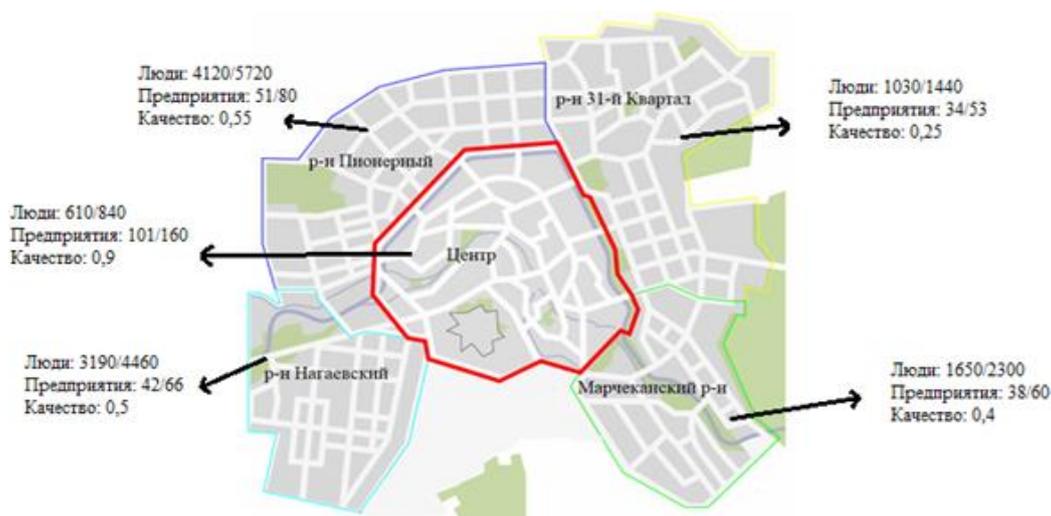


Рис. 4. Начальные параметры для каждой зоны

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

Период моделирования соответствует календарю, начинающемуся в 12:00 1 января 2020 г. и заканчивающемуся в 12:00 1 января 2030 г., т. е. периоду в 10 лет, в которых наименьшая единица времени, генерирующая событие, равна дню. Важно отметить, что в любом моделировании должен быть период, чтобы позволить модели достичь равновесия. В начале, например, выбор местонахождения каждого агента-жителя не зависит от получаемого им дохода, поэтому потребуется некоторое время для его адаптации к своему экономическому положению.

Эксперимент № 1

Начальные условия модели: общественный транспорт – стоимость билета (RUB/поездка) – 1 (эквивалентен 40 руб.), средняя скорость (км/ч) – 18; автомобиль – стоимость топ-

лива (RUB/км) – 0,1 (эквивалентен 60 руб.); скоростной режим (км/ч) – 40.

В начале проведения эксперимента только 37 % жителей работают на предприятии района, в котором проживают, а остальным 63 % приходится ездить в другие районы.

Каждый из видов передвижения жителей имеет приблизительно одинаковое процентное соотношение.

Удовлетворенность качеством жизни горожан, проживающих на территории района на начальный период имитационного исследования: удовлетворенных жителей – 50 %, частично неудовлетворенных – 37 %, полностью неудовлетворенных – 13 %.

Через 10 лет заканчивается период моделирования (графики изменения количества жителей в каждом районе показаны на рис. 5).

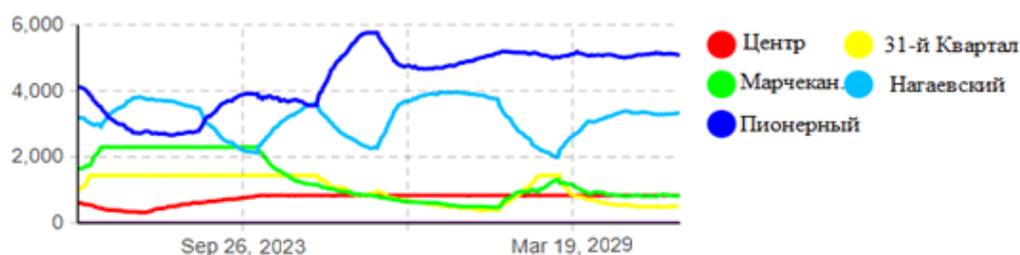


Рис. 5. Изменение количества жителей по районам в эксперименте № 1

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

Процент жителей, работающих в своем районе, уменьшился до 20 %, а процент жителей, работающих в других районах, увеличился до 80 %.

Такие изменения отчасти повлияли на пользование общественным транспортом, которое после симуляции составило примерно 48 %, тех, кто передвигается пешком, стало 18 %, а процент пользователей собственными автомобилями остался неизменным – 33 %.

Во многом на состояние каждого жителя влияет его зарплата и расходы. В начале эксперимента средняя зарплата составляла 45 000 руб. В процессе симуляции средняя сумма зарплаты падала до 20 000 руб. либо поднималась до 95 000 руб., по завершению симуляции средняя заработная плата составила 60 000 руб.

Суммы, отведенные на арендную плату (оплату коммунальных услуг), также динамически изменялись. По истечению времени

эксперимента сумма, предназначенная для данных трат, приняла первоначальное значение в размере 10 000 руб.

В ходе симуляции удовлетворенности качеством жизни жителей количество удовлетворенных жителей увеличилось на 24 %, полностью неудовлетворенных уменьшилось на 6 %, в состоянии средней неудовлетворенности жителей стало на 18 % меньше.

Также произошли изменения и в остальных параметрах, но они не являются значительными.

Анализ полученных в ходе эксперимента результатов показал следующие изменения:

1. Значительное перераспределение жителей города: самым густонаселенным районом остался Пионерный (5 090), районом с наименьшей плотностью стал 31-й Квартал (500).

2. Число работающих в районе проживания упало на 17 %.

3. Доход граждан увеличился на 15 000 руб.

Эксперимент № 2

Начальные условия модели: общественный транспорт – стоимость билета (RUB/поездка) – 1,5 (эквивалентен 60 руб.), средняя скорость (км/ч) – 30; автомобиль – стоимость

топлива (RUB/км) – 0,15 (эквивалентен 90 руб.); скоростной режим (км/ч) – 50.

Графики изменения количества жителей по районам представлены на рис. 6.

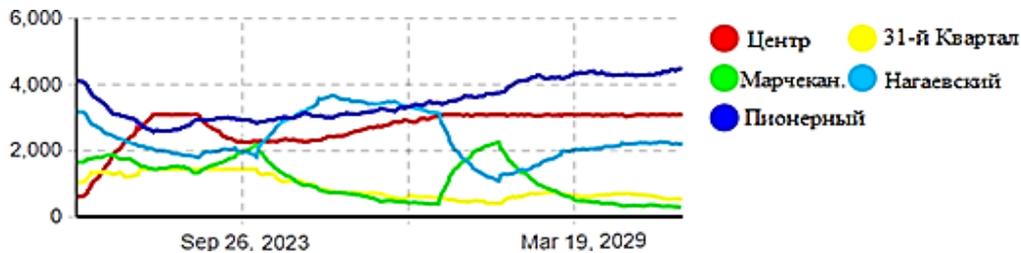


Рис. 6. Изменение количества жителей по районам в эксперименте № 2

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

Процент жителей, работающих в районах проживания, уменьшился до 23 %, а работающих в других районах увеличился до 77 %.

В результате изменений параметров модели можно заметить, что, в отличие от условий первого эксперимента, в начальных условиях второго большее число жителей использовали для передвижения личные автомобили и в ходе симуляции произошло небольшое увеличение их числа до 55,6 %, передвижение на общественном транспорте составило 21,3 %, пешком – 23,1 %.

В начале эксперимента средняя заработная плата на предприятиях составляла 20 000 руб. В процессе симуляции средняя зарплата опускалась не ниже 20 000 руб. и поднималась приблизительно до 105 000 руб., по завершению симуляции средняя зарплата составила 65 000 руб.

По завершении периода эксперимента сумма арендной платы (оплаты коммунальных услуг) приняла значение 15 000 руб.

Количество удовлетворенных жителей увеличилось и составило 79 %, полностью

неудовлетворенных уменьшилось до 4 %, в состоянии средней неудовлетворенности стало 17 %.

Таким образом, произошли следующие изменения:

1. Значительное перераспределение жителей города: самым густонаселенным районом остался Пионерный (4 470), районом с наименьшей плотностью населения стал Марчканский (280).

2. Процент работающих в районе своего проживания упал на 14 %.

3. Доход граждан увеличился на 45 000 руб.

Эксперимент № 3

Начальные условия модели: общественный транспорт – стоимость билета (RUB/поездка) – 1,3 (эквивалентен 52 руб.), средняя скорость (км/ч) – 25; автомобиль – стоимость топлива (RUB/км) – 0,15 (эквивалентен 90 руб.); скоростной режим (км/ч) – 55.

Графики изменения количества жителей по районам представлены на рис. 7.

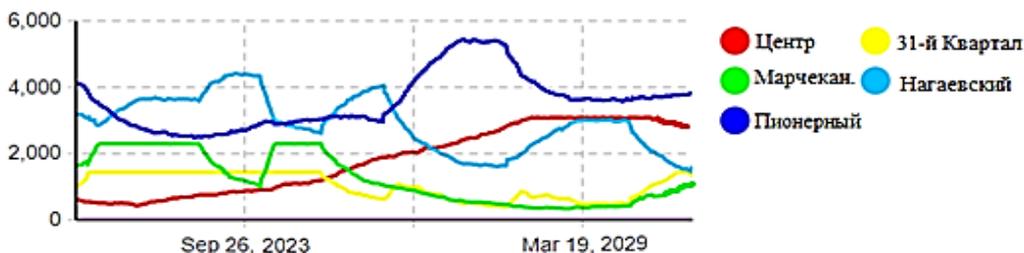


Рис. 7. Изменение количества жителей по районам в эксперименте № 3

Примечание: составлено авторами на основании материалов из открытых источников.

В результате изменений параметров модели можно отметить, что процент жителей, работающих в районах проживания, уменьшился до 23 %, а работающих в других районах увеличился до 77 %.

В отличие от первого, в начальных условиях третьего эксперимента большее число жителей использовали для передвижения личные автомобили и в ходе симуляции произошло небольшое увеличение этого числа до 47 %, выбирающих общественный транспорт составило 24,7 %, пешком – 28,3 %.

Средняя заработная плата на предприятиях составляла в начале эксперимента 50 000 руб. В процессе симуляции средняя зарплата не опускалась ниже 48 000 руб., по завершению симуляции составила 68 000 руб.

Стоимость арендной платы также динамически изменялась и составила максимум в начале около 20 000 руб. и по завершению эксперимента – 14 500 руб.

Количество удовлетворенных жителей увеличилось и составило 82 %, полностью неудовлетворенных уменьшилось до 3 %, в состоянии средней неудовлетворенности стало 15 %.

Самым густонаселенным районом остался Пионерный, районом с наименьшей плотностью населения стал Марчканский. Число работающих в районе своего проживания снизилось на 3 %, доход увеличился на 18 000 руб.

Так как в ходе проведенных экспериментов не удалось достигнуть равномерного расселения жителей по районам и обеспеченности работой большей части жителей в районах своего проживания, можно предположить, что требуется ввести больше условий для разработки плана развития городской среды.

Для равномерного расселения жителей требуется, вероятно, равномерное распределение по районам предприятий с достаточным количеством рабочих мест, помощь работникам предприятий в аренде жилья в своем районе, чтобы сотрудникам было удобнее добираться до своего места работы.

Благодаря структуризации города на зоны – жилые, промышленные и др., а также на микрорайоны, кварталы и пр., появляется возможность рациональной планировки и застройки городской территории.

Результаты экспериментов показали, что снижение стоимости за проезд на общественном транспорте влияет на количество использующих его горожан.

Несмотря на возросшую цену на бензин, произошел рост использования личного транспорта, что, вероятно, обосновывается увеличением доходов жителей города.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная работа посвящена агент-ориентированному моделированию динамики развития городской среды на основе платформы AnyLogic, которая может использоваться для проведения экспериментов с моделью города.

Конечным итогом проведенного исследования является пошагово разработанная модель развития городской среды, которая предназначена для реализации мультиагентного подхода. Были проведены вычислительные эксперименты по изучению динамических характеристик городской среды, что в итоге позволило разработать практические рекомендации по их улучшению.

Список источников

1. Aithal T. B., Vinay S., Ramachandra T. V. Agent based modelling urban dynamics of Bhopal, India. *Journal of Settlements and Spatial Planning*. 2016;7(1):1–14.
2. Malik A., Abdalla R. Agent-based modelling for urban sprawl in the region of Waterloo, Ontario, Canada. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2017;3(1):1–9.
3. González-Méndez M., Olaya C., Fasolino I. et al. Agent-based modeling for urban development planning based on human needs. Conceptual basis and model formulation. *Land Use Policy*. 2021;101:105110.

References

1. Aithal T. B., Vinay S., Ramachandra T. V. Agent based modelling urban dynamics of Bhopal, India. *Journal of Settlements and Spatial Planning*. 2016;7(1):1–14.
2. Malik A., Abdalla R. Agent-based modelling for urban sprawl in the region of Waterloo, Ontario, Canada. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2017;3(1):1–9.
3. González-Méndez M., Olaya C., Fasolino I. et al. Agent-based modeling for urban development planning based on human needs. Conceptual basis and model formulation. *Land Use Policy*. 2021;101:105110.

4. Hosseinali F., Alesheikh A. A., Nourian F. Agent-based modeling of urban land-use development, case study: Simulating future scenarios of Qazvin city. *Cities*. 2013;31:105–113.
5. Bingöl C. K., Çolakoğlu B. Agent-based urban growth simulation – A case study on Istanbul. In: Herneoja A., Österlund T., Markkanen P., editors. *Complexity & Simplicity – Proceedings of the 34th eCAADe Conference*, August 22–26, 2016, Oulu, Finland. Vol. 2. p. 41–48.
6. Barramou F., Addou M. Agent-based model for simulating urban system. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020;11(12):353–362.
7. Arsanjani J. J., Helbich M., de Noronha Vaz E. Spatiotemporal simulation of urban growth patterns using agent-based modeling: The case of Tehran. *Cities*. 2013;32:33–42.
8. AnyLogic. URL: www.anylogic.ru (дата обращения: 19.07.2023).
4. Hosseinali F., Alesheikh A. A., Nourian F. Agent-based modeling of urban land-use development, case study: Simulating future scenarios of Qazvin city. *Cities*. 2013;31:105–113.
5. Bingöl C. K., Çolakoğlu B. Agent-based urban growth simulation – A case study on Istanbul. In: Herneoja A., Österlund T., Markkanen P., editors. *Complexity & Simplicity – Proceedings of the 34th eCAADe Conference*, August 22–26, 2016, Oulu, Finland. Vol. 2. p. 41–48.
6. Barramou F., Addou M. Agent-based model for simulating urban system. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020;11(12):353–362.
7. Arsanjani J. J., Helbich M., de Noronha Vaz E. Spatiotemporal simulation of urban growth patterns using agent-based modeling: The case of Tehran. *Cities*. 2013;32:33–42.
8. AnyLogic. URL: www.anylogic.ru (accessed: 19.07.2023). (In Russian).

Информация об авторах

О. А. Ковалева – доктор технических наук, доцент.
А. Б. Саплина – аспирант.
С. В. Ковалев – доктор технических наук, доцент.
М. Ю. Сидляр – старший преподаватель.
И. С. Казарин – аспирант.

Information about the authors

O. A. Kovaleva – Doctor of Sciences (Engineering),
Docent.
A. B. Saplina – Postgraduate.
S. V. Kovalev – Doctor of Sciences (Engineering),
Docent.
M. Yu. Sidlyar – Senior Lecturer.
I. S. Kazarin – Postgraduate.

Научная статья
УДК 681.5:612.112
DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-43-51

НЕЙРОСЕТЕВОЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛЕЙКОЦИТОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ КРОВИ

Максим Алексеевич Панин^{1✉}, Элишан Шахинович Мамедов²,
Дмитрий Викторович Тараканов³

^{1, 2, 3} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ panin@edu.surgu.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0007-6899-3108>

² tamedov_esh@surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7118-9001>

³ sprtdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>

Аннотация. В статье рассматривается применение метода трансферного обучения ансамбля искусственных сверточных нейронных сетей с предварительной сегментацией клеток крови на цифровых изображениях для последующей классификации их типов. Полученные результаты нейросетевой классификации свидетельствуют об эффективности использования рассматриваемых технологий для повышения точности искусственных нейронных сетей при решении задач сегментации медицинских изображений лейкоцитов с целью диагностики заболеваний крови.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, классификация, диагностика, распознавание медицинских изображений, глубокое обучение

Для цитирования: Панин М. А., Мамедов Э. Ш., Тараканов Д. В. Нейросетевой анализ цифровых изображений лейкоцитов для обнаружения заболеваний крови // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 43–51. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-43-51.

Original article

AN ANALYSIS OF DIGITAL IMAGES USING NEURAL NETWORKS TO DETECT HEMATOLOGIC DISEASES

Maksim A. Panin^{1✉}, Elishan Sh. Mamedov², Dmitry V. Tarakanov³

^{1, 2, 3} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ panin@edu.surgu.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0007-6899-3108>

² tamedov_esh@surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7118-9001>

³ sprtdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1851-1039>

Abstract. The article discusses the application of the transfer learning method for the ensemble of artificial convolutional neural networks with preliminary digital image segmentation for blood cells in order to classify them later. The results obtained during neural networks classification demonstrate the efficiency of such technologies used for improving the accuracy of artificial neural networks when solving the problems of medical images segmentation for leukocytes in order to diagnose hematologic diseases.

Keywords: convolutional neural networks, classification, diagnosing, reading of medical images, deep learning

For citation: Panin M. A., Mamedov E. Sh., Tarakanov D. V. An analysis of digital images using neural networks to detect hematologic diseases. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):43–51. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-43-51.

ВВЕДЕНИЕ

Своевременная диагностика онкологических заболеваний крови является одной из важнейших задач в медицине, поэтому качественная обработка цифровых изображений клеток

крови позволяет ускорить время определения наличия у пациента заболевания [1–3].

В данной статье рассмотрены методы решения задачи семантической сегментации медицинских изображений с использованием

сверточных нейронных сетей (convolutional neural networks – CNN). Сегментация изображений в «компьютерном зрении» – это процесс разделения цифрового изображения на несколько областей с учетом различных свойств пикселей, важный инструмент для диагностики и обнаружения патологий на медицинских изображениях.

Для решения задачи медицинской диагностики используются две стандартные архитектуры CNN: U-Net и SE-Net [4–6], которые являются эффективными методами решения задачи семантической сегментации, позволяющие точно определять органы, аномалии и структуры на медицинских изображениях.

U-Net – типичная архитектура CNN для сегментации медицинских изображений, состоит из сужающегося и расширяющегося пути. Сужающийся путь включает повторяющиеся свертки и операции пулинга для понижения разрешения, а расширяющийся путь выполняет операции повышающей дискретизации и объединения с предыдущими слоями. U-Net позволяет создавать маску, разделяющую изображение на несколько классов.

SE-Net состоит из модулей кодирования объектов, извлечения контекста и декодирования объектов. Модуль кодирования использует предварительно обученную сеть ResNet-34, добавляя механизм быстрого доступа. Модуль

извлечения контекста извлекает контекстную семантическую информацию с помощью блока DAC (Dense Atrous Convolution) и блока RMP (Reduced MultiPath). Модуль декодера восстанавливает семантические объекты высокого уровня.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Острый лимфобластный лейкоз (acute lymphoblastic leukemia – ALL) составляет около 25 % педиатрических раковых заболеваний [7]. Идентификации незрелых лейкемических blasts под микроскопом и их дифференциация от нормальных клеток является сложной задачей, поскольку морфологически изображения этих двух клеток похожи.

Задача разбита на два отдельных этапа со следующими изображениями обучающего набора:

- испытуемых образцов всего – 73; ALL (рак) – 47; норма – 26;

- изображений клеток всего – 10 661; ALL (рак) – 7 272; норма – 3 389.

Состав изображений предварительного тестового набора:

- испытуемых образцов всего – 28; ALL (рак) – 13; норма – 15;

- изображений клеток всего – 1 867; ALL (рак) – 1 219; норма – 648.

Пример изображений на рис. 1.

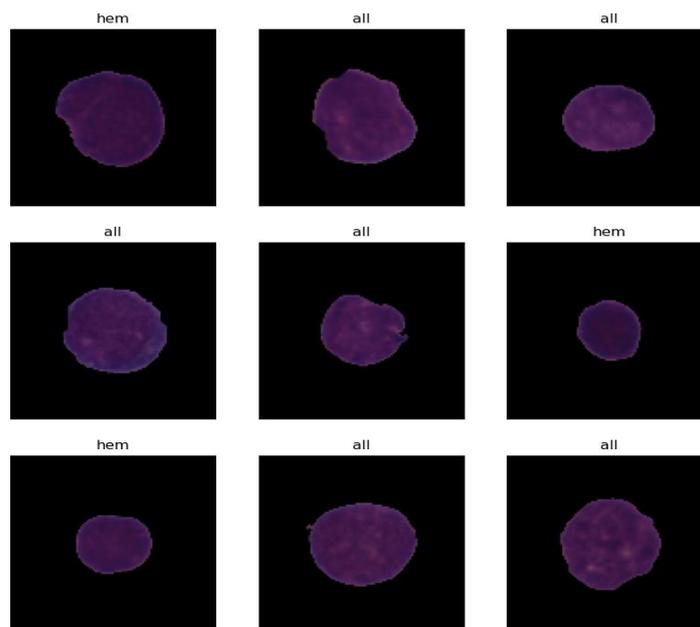


Рис. 1. Пример изображений клеток крови
Примечание: составлено по [8].

Датасет Munich AML Morphology содержит 18 365 помеченных экспертами Университетской клиники Мюнхена в период с 2014 по 2017 гг. изображений клетки, полученных из мазков периферической крови 100 пациентов с диагнозом «острый миелоидный лейкоз», и 100 пациентов – без признаков гематологического злокачественного заболевания. Изображения получены с помощью цифрового микроскопа/сканера M8 (Precipoint GmbH, Фрайзинг, Германия) при 100-кратном оптическом увеличении и масляной иммерсии. Па-

тологические и непатологические лейкоциты классифицировались обученными экспертами по стандартной схеме морфологической классификации, полученной из клинической практики. Для количественной оценки меж- и внутрирейтинговой вариабельности экспертиз подмножество изображений повторно аннотировали. Набор данных был использован при обучении CNN для классификации морфологии одноклеточных. Пример изображений показан на рис. 2.

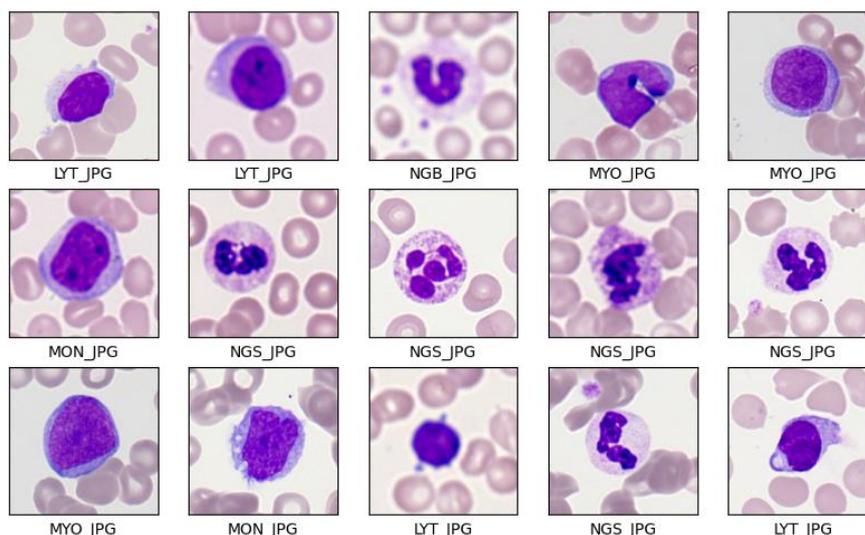


Рис. 2. Пример группы лейкоцитов
Примечание: составлено по [9].

Обучающая выборка для задачи классификации построена таким образом, что заранее известно, к какому классу относится то или иное изображение. Это позволяет определить, что данная задача относится к разделу «обучение с учителем» – к классификации, а именно – к классификации изображений лейкоцитов.

Тестирование для обучения SE-Net и U-Net с использованием каждого набора данных показало хороший потенциал для классификации медицинских изображений, поэтому для решения задачи анализа цифровых изображений лейкоцитов была создана оригинальная нейронная сеть, обладающая всеми их преимуществами.

На рис. 3 показана архитектура модели созданной нейронной сети № 1 для классификации изображений лейкоцитов. Первый слой позволяет расширить обучающую выборку

путем создания новых изображений, изменяя масштаб и угол поворота изображений. Второй слой нормализует все значения RGB-матрицы изображения к диапазону от 0 до 1. Следующим идет слой двумерной свертки, где первый параметр – это размерность выходного пространства, а второй параметр – окно свертки – это размер 2D-матрицы. Именно благодаря окну свертки нейронная сеть «запоминает» отличительные особенности каждого изображения. Следующий слой уменьшает размерность изображения, после чего размерность двумерной свертки увеличивается, повторяясь таким образом до слоя Flatten, который уменьшает размер входящих данных. Затем полученный массив преобразуется в одномерный и сокращается до количества меток для классификации. Схема слоев нейронной сети показана на рис. 4.

```

model_5 = Sequential([
    data_augmentation,
    layers.Rescaling(1./255, input_shape=(200, 200, 3)),
    layers.Conv2D(16, 3, padding='same', activation='relu'),
    layers.MaxPooling2D(),
    layers.Conv2D(32, 3, padding='same', activation='relu'),
    layers.MaxPooling2D(),
    layers.Conv2D(64, 3, padding='same', activation='relu'),
    layers.MaxPooling2D(),
    layers.Conv2D(128, 3, padding='same', activation='relu'),
    layers.MaxPooling2D(),
    layers.Conv2D(256, 3, padding='same', activation='relu'),
    layers.MaxPooling2D(),
    layers.Conv2D(512, 3, padding='same', activation='relu'),
    layers.MaxPooling2D(),
    layers.Flatten(),
    layers.Dense(128, activation='relu'),
    layers.Dense(num_classes)
])

model_5.compile(optimizer='adam',
               loss=tf.keras.losses.SparseCategoricalCrossentropy(from_logits=True),
               metrics=['accuracy'])
    
```

Рис. 3. Слои модели нейронной сети № 1
 Примечание: фото авторов.

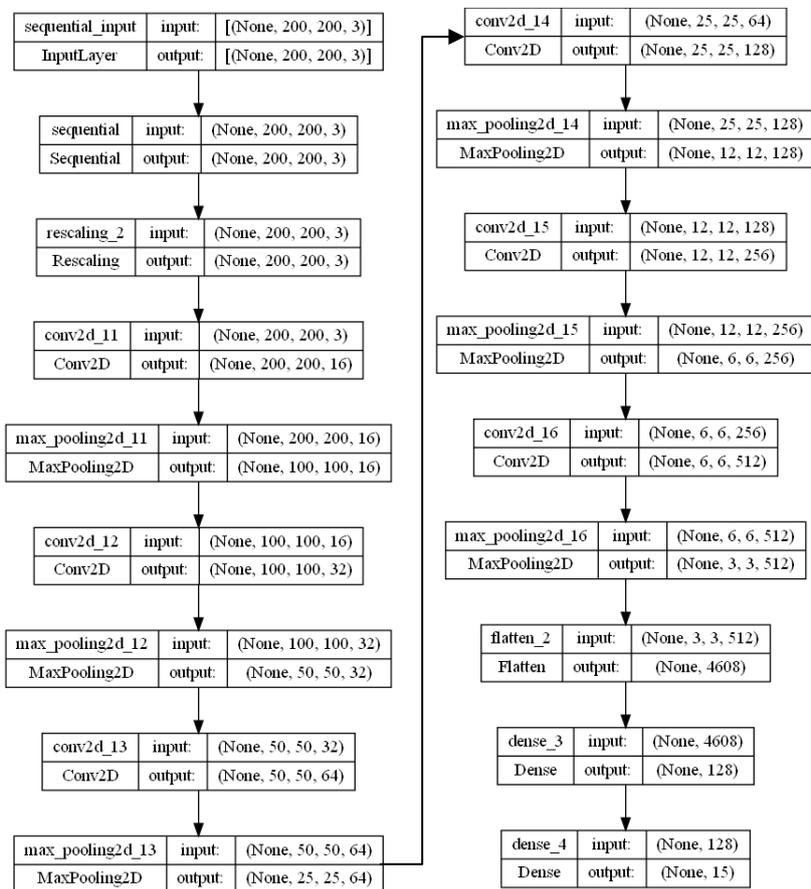


Рис. 4. Блок-схема слоев модели нейронной сети № 1
 Примечание: фото авторов.

Оптимизатор Adam – один из самых эффективных алгоритмов оптимизации в обучении нейронных сетей, сочетающий в себе идеи RMSProp и оптимизатора импульса. Вместо того чтобы адаптировать скорость обучения

параметров на основе среднего первого момента (среднего значения), как в RMSProp, Adam также использует среднее значение вторых моментов градиентов.

Оценка потерь вычисляется при помощи `SparseCategoricalCrossentropy`, а именно вычисляется функция потери кросс-энтропии между реальными классами и их прогнозами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нейронные сети способны быстро и с минимальной погрешностью находить по статическим данным и изображениям нужную информацию. В рамках данного исследования были использованы два набора данных, находящихся в открытом доступе: первый – с изображениями различных лейкоцитов, которые могут быть предвестниками раковых заболеваний крови, второй – с изображениями здоровых и зараженных лейкоцитарных бластов. Успешное создание моделей, способных классифицировать изображения,

и интеграция их в медицинские учреждения позволит значительно ускорить время определения наличия заболевания у пациента.

На рис. 5 показан результат обучения модели нейронной сети № 1. Точность на тренировочном наборе данных 93 %, точность на тестовом – 89 %. Показатель `loss` показывает общую тенденцию обучения нейронной сети. Уменьшение метрики с каждой эпохой свидетельствует о том, что процесс обучения идет правильно, а кратковременное увеличение метрики `val_loss` и дальнейшее ее уменьшение – о том, что нейронная сеть в процессе обучения столкнулась с новыми данными. В результате обучения сеть адаптировалась к новым изображениям. Метрики `val_loss` и `val_accuracy` подтвердили успешное обучение нейронной сети.

```

epochs = 15
history = model_5.fit(
    train_ds,
    validation_data=val_ds,
    epochs=epochs
)

```

```

Epoch 1/15
39/39 [=====] - 321s 75/step - loss: 1.3368 - accuracy: 0.5297 - val_loss: 1.3617 - val_accuracy: 0.59
54
Epoch 2/15
39/39 [=====] - 241s 65/step - loss: 0.7128 - accuracy: 0.7772 - val_loss: 0.8421 - val_accuracy: 0.79
52
Epoch 3/15
39/39 [=====] - 243s 65/step - loss: 0.5112 - accuracy: 0.8496 - val_loss: 0.7783 - val_accuracy: 0.79
28
Epoch 4/15
39/39 [=====] - 245s 65/step - loss: 0.4461 - accuracy: 0.8640 - val_loss: 0.5957 - val_accuracy: 0.85
10
Epoch 5/15
39/39 [=====] - 246s 65/step - loss: 0.4097 - accuracy: 0.8758 - val_loss: 0.5806 - val_accuracy: 0.84
85
Epoch 6/15
39/39 [=====] - 249s 65/step - loss: 0.3703 - accuracy: 0.8889 - val_loss: 0.5320 - val_accuracy: 0.85
94
Epoch 7/15
39/39 [=====] - 320s 85/step - loss: 0.3616 - accuracy: 0.8899 - val_loss: 0.5350 - val_accuracy: 0.86
36
Epoch 8/15
39/39 [=====] - 346s 85/step - loss: 0.3385 - accuracy: 0.8949 - val_loss: 0.6127 - val_accuracy: 0.82
96
Epoch 9/15
39/39 [=====] - 309s 75/step - loss: 0.3530 - accuracy: 0.8910 - val_loss: 0.5413 - val_accuracy: 0.86
54
Epoch 10/15
39/39 [=====] - 265s 75/step - loss: 0.3080 - accuracy: 0.9049 - val_loss: 0.4939 - val_accuracy: 0.87
03
Epoch 11/15
39/39 [=====] - 271s 75/step - loss: 0.2850 - accuracy: 0.9142 - val_loss: 0.5106 - val_accuracy: 0.85
55
Epoch 12/15
39/39 [=====] - 269s 75/step - loss: 0.2879 - accuracy: 0.9166 - val_loss: 0.6902 - val_accuracy: 0.83
13
Epoch 13/15
39/39 [=====] - 311s 85/step - loss: 0.2675 - accuracy: 0.9209 - val_loss: 0.4582 - val_accuracy: 0.87
76
Epoch 14/15
39/39 [=====] - 305s 75/step - loss: 0.2414 - accuracy: 0.9301 - val_loss: 0.4242 - val_accuracy: 0.89
13
Epoch 15/15
39/39 [=====] - 280s 75/step - loss: 0.2319 - accuracy: 0.9319 - val_loss: 0.4157 - val_accuracy: 0.89
20

```

Рис. 5. Результат обучения модели нейронной сети № 1

Примечание: фото авторов.

На рис. 6 представлен график обучения модели нейронной сети № 1. Как видно на гра-

фике, с увеличением количества эпох растет точность нейронной сети, а потери, наоборот,

падают. Точность в пике составляет чуть более 90 % у тестового набора данных, и примерно 85 % – у проверочного. Также на гра-

фике видно, что потери с увеличением количества эпох падают.

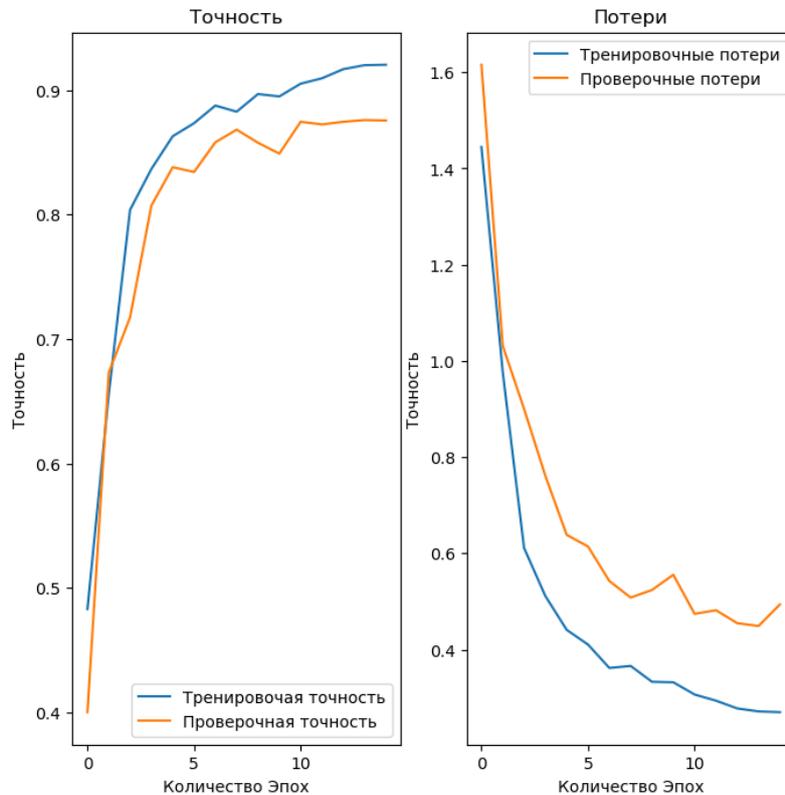


Рис. 6. График обучения модели нейронной сети № 1
Примечание: фото авторов.

Слой модели нейронной сети № 2 для классификации изображений лейкоцитарных бластов очень схожи со слоями первой нейронной сети, однако имеется ряд отличий. Максимальный размер выходного пространства – слоя двумерной свертки, равен 64,

тогда как на предыдущем примере – 512. Также не применяются слои нормализации и расширения выборки. Параметры оптимизации остались те же (рис. 7). На рис. 8 показана блок-схема с новыми слоями модели и гиперпараметрами.

```
num_classes = len(class_names)

model_0 = Sequential([
    layers.Conv2D(16, 3, padding='same', activation='relu'),
    layers.MaxPooling2D(),
    layers.Conv2D(32, 3, padding='same', activation='relu'),
    layers.MaxPooling2D(),
    layers.Conv2D(64, 3, padding='same', activation='relu'),
    layers.MaxPooling2D(),
    layers.Flatten(),
    layers.Dense(128, activation='relu'),
    layers.Dense(num_classes)
])

model_0.compile(optimizer='adam',
               loss=tf.keras.losses.SparseCategoricalCrossentropy(from_logits=True),
               metrics=['accuracy'])
```

Рис. 7. Слой модели нейронной сети № 2 для классификации клеток крови
Примечание: фото авторов.

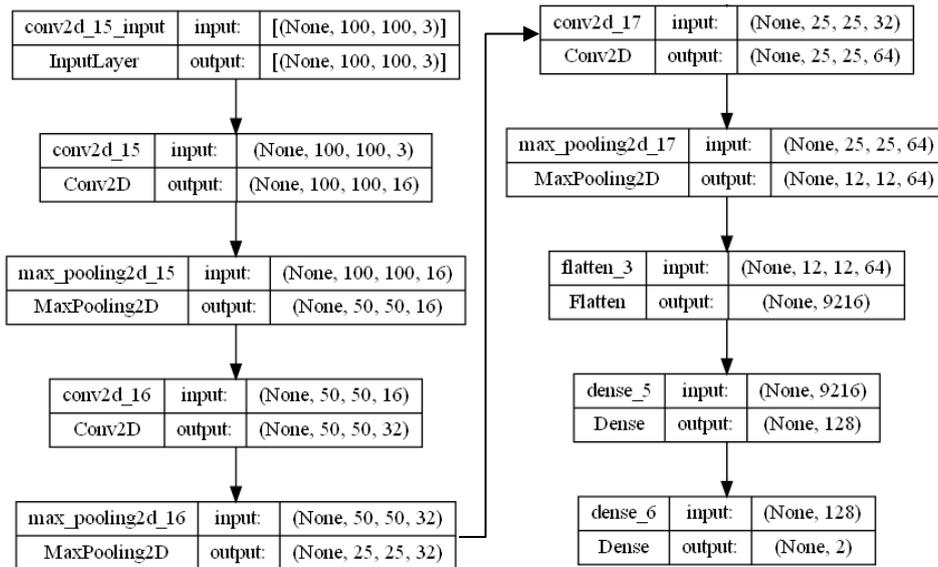


Рис. 8. Блок-схема модели нейронной сети № 2

Примечание: фото авторов.

На рис. 9 показан результат обучения модели нейронной сети № 2. Минимальное увеличение и изменение метрики loss свидетельствует о минимальной погрешности в работе нейронной сети [5]. Точность модели равняется 84 % на тестовом наборе данных и 74 % – на проверочном. На рис. 10 изображен график обучения модели. Как видно на графике, с увеличением количества эпох растет точность нейронной сети, а потери, наоборот, падают. Точность в пике состав-

ляет чуть более 80 % у тестового набора данных и около 75 % – у проверочного, которые не сильно изменяются в процессе обучения. Также на графике видно, что потери у тестового набора данных с увеличением количества эпох резко падают. Потери у проверочного набора данных падают не так резко и значительно, как у тестового, что может свидетельствовать о наличии у модели нейронной сети определенной погрешности классификации.

```

epochs = 10
history = model_0.fit(
    train_ds,
    validation_data=val_ds,
    epochs=epochs)

Epoch 1/10
9/9 [=====] - 26s 2s/step - loss: 11.4919 - accuracy: 0.5964 - val_loss: 1.0694 - val_accuracy: 0.7028
Epoch 2/10
9/9 [=====] - 21s 2s/step - loss: 0.6535 - accuracy: 0.8076 - val_loss: 0.6280 - val_accuracy: 0.7268
Epoch 3/10
9/9 [=====] - 22s 2s/step - loss: 0.4545 - accuracy: 0.7976 - val_loss: 0.6694 - val_accuracy: 0.7451
Epoch 4/10
9/9 [=====] - 23s 2s/step - loss: 0.4233 - accuracy: 0.8250 - val_loss: 0.5694 - val_accuracy: 0.7451
Epoch 5/10
9/9 [=====] - 21s 2s/step - loss: 0.4043 - accuracy: 0.8330 - val_loss: 0.5578 - val_accuracy: 0.7493
Epoch 6/10
9/9 [=====] - 25s 2s/step - loss: 0.4007 - accuracy: 0.8333 - val_loss: 0.5844 - val_accuracy: 0.7423
Epoch 7/10
9/9 [=====] - 20s 2s/step - loss: 0.3968 - accuracy: 0.8328 - val_loss: 0.5783 - val_accuracy: 0.7465
Epoch 8/10
9/9 [=====] - 21s 2s/step - loss: 0.3955 - accuracy: 0.8352 - val_loss: 0.5652 - val_accuracy: 0.7408
Epoch 9/10
9/9 [=====] - 22s 2s/step - loss: 0.3885 - accuracy: 0.8384 - val_loss: 0.5746 - val_accuracy: 0.7437
Epoch 10/10
9/9 [=====] - 21s 2s/step - loss: 0.3842 - accuracy: 0.8403 - val_loss: 0.5600 - val_accuracy: 0.7437
    
```

Рис. 9. Результат обучения модели нейронной сети № 2

Примечание: фото авторов.

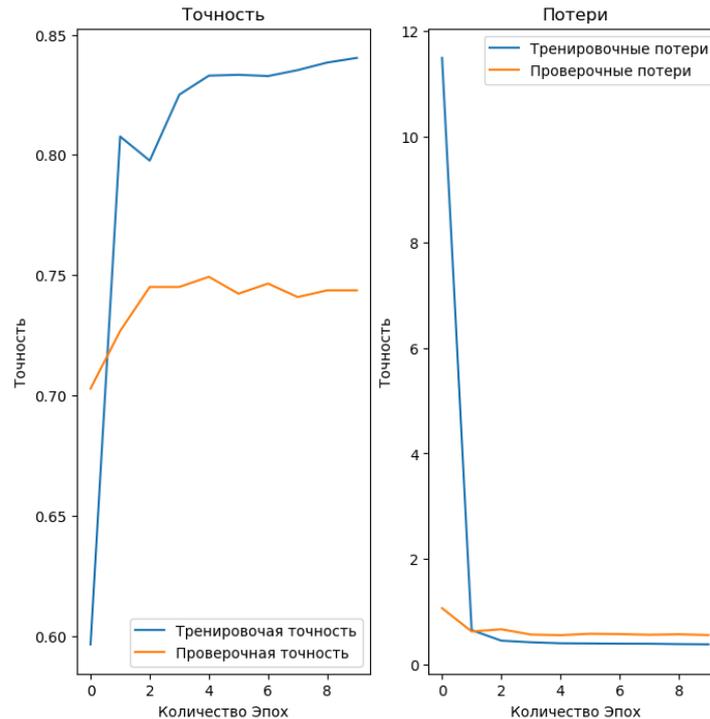


Рис. 10. График обучения модели нейронной сети № 2
Примечание: фото авторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты нейросетевой обработки изображений клеток крови. В процессе обучения нейронной сети использовался объединенный датасет, состоящий из трех разных наборов данных. Показано, что объединение моделей приводит к повышению точности сегментации лейкоцитов путем усреднения прогнозов трех моделей, что позволяет ансамблю достигать наиболее

точного результата. Исследование имеет практическую значимость, поскольку предлагаемые методы могут быть применены в автоматизированных системах гематологических лабораторий. Это может повысить эффективность и качество работы систем и ускорить процесс классификации лейкоцитов и анализа крови для своевременной диагностики заболеваний пациентов.

Список источников

1. Бурхонов Р. А., Клименко С. В. Применение методов глубокого обучения в задаче распознавания медицинских изображений : труды междунар. науч. конф. СРТ1617, 08–15 мая 2016 г.; 07–14 мая 2017 г., г. Ларнака, Республика Кипр; 28–29 июня 2016 г., г. Царьград, Россия. М. ; Протвино : ИФТИ, 2017. С. 163–165.
2. Пеников А. А., Белов Ю. С. Обзор архитектур сверточных нейронных сетей для решения задачи семантической сегментации медицинских изображений // Фундаментальные и прикладные исследования. Актуальные проблемы и достижения : сб. избранных статей Всерос. национал. науч. конф., 11 января 2022 г., г. Санкт-Петербург. СПб. : ГНИИ «НАЦРАЗВИТИЕ», 2022. С. 18–21.
3. Gu Z., Cheng J., Fu H. et al. CE-Net: Context encoder network for 2D medical image segmentation. *IEEE*

References

1. Burkhonov R. A., Klimenko S. V. Using methods of deep learning for medical image analysis. In: *Proceedings of the International Conference CPT1617*, May 08–15, 2016; May 07–14, 2017, Larnaca, Cyprus; June 28–29, 2016, TzarGrad, Russia. Moscow; Protvino: ICPT; 2017. p. 163–165. (In Russian).
2. Penikov A. A., Belov Yu. S. Overview of convolutional neural network architectures for solving the problem of semantic segmentation of medical images. In: *Proceedings of the All-Russian National Scientific Conference "Fundamentalnye i prikladnye issledovaniia"*, January 11, 2022, Saint Petersburg. St. Petersburg: Humanitarian National Research Institute NATsRAZVITIE; 2022. p. 18–21. (In Russian).
3. Gu Z., Cheng J., Fu H. et al. CE-Net: Context encoder network for 2D medical image segmentation. *IEEE*

-
- Transactions on Medical Imaging*. 2019;38(10):2281–2292.
4. Погружение в сверточные нейронные сети: передача обучения (transfer learning). URL: <https://habr.com/ru/post/467967/> (дата обращения: 14.09.2023).
 5. Keras Applications. URL: <https://keras.io/api/applications/> (дата обращения: 14.09.2023).
 6. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *ArXiv*. 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1409.1556.pdf> (дата обращения: 14.09.2023).
 7. Куркова А. А., Григорьева А. И. Дифференциальная диагностика острого лимфобластного и острого миелобластного лейкозов // Смоленский медицинский альманах. 2018. № 1. С. 191–196.
 8. C_NMC_2019 dataset: ALL challenge dataset of ISBI 2019 (C-NMC 2019). URL: <https://wiki.cancerimagingarchive.net/pages/viewpage.action?pageId=52758223#52758223a9c2c0a8b429412880eaa123286ca6f7> (дата обращения: 14.09.2023).
 9. A single-cell morphological dataset of leukocytes from AML patients and non-malignant controls (AML-Cytomorphology_LMU). URL: <https://wiki.cancerimagingarchive.net/pages/viewpage.action?pageId=61080958#610809587633e163895b484eafe5794e2017c585> (дата обращения: 14.09.2023).
- Transactions on Medical Imaging*. 2019;38(10):2281–2292.
4. Pogruzhenie v svertochnye neironnye seti: peredacha obucheniia (transfer learning). URL: <https://habr.com/ru/post/467967/> (accessed: 14.09.2023). (In Russian).
 5. Keras Applications. URL: <https://keras.io/api/applications/> (accessed: 14.09.2023).
 6. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *ArXiv*. 2015. URL: <https://arxiv.org/pdf/1409.1556.pdf> (accessed: 14.09.2023).
 7. Kurkova A. A., Grigoryeva A. I. Differential diagnostics of acute lymphoblastic and myeloblastic leukemia. *Smolensk Medical Almanac*. 2018;(1):191–196. (In Russian).
 8. C_NMC_2019 dataset: ALL challenge dataset of ISBI 2019 (C-NMC 2019). URL: <https://wiki.cancerimagingarchive.net/pages/viewpage.action?pageId=52758223#52758223a9c2c0a8b429412880eaa123286ca6f7> (accessed: 14.09.2023).
 9. A single-cell morphological dataset of leukocytes from AML patients and non-malignant controls (AML-Cytomorphology_LMU). URL: <https://wiki.cancerimagingarchive.net/pages/viewpage.action?pageId=61080958#610809587633e163895b484eafe5794e2017c585> (accessed: 14.09.2023).

Информация об авторах

М. А. Панин – магистрант.

Э. Ш. Мамедов – магистрант.

Д. В. Тараканов – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

M. A. Panin – Master’s Degree Student.

E. Sh. Mamedov – Master’s Degree Student.

D. V. Tarakanov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

Научная статья
УДК 551.5:629.7
DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-52-59

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Юрий Борисович Попов^{1✉}, **Антон Павлович Корнаков**², **Ксения Юрьевна Попова**³,
Евгений Владимирович Макаров⁴

^{1, 2, 3, 4} Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия

¹ iurii.b.popov@tusur.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-1627-2188>

² deidara2074@gmail.com

³ dku81@mail.ru

⁴ evmakarov@yahoo.com

Аннотация. В статье рассмотрен способ определения значений скорости и направления ветра в требуемой точке атмосферного пограничного слоя с использованием беспилотного летательного аппарата мультироторного типа. Расчет скорости и направления ветра осуществляется в режиме зависания мультикоптера в точке с заданными координатами с использованием текущих измерений наклона вектора тяги, потребляемой каждым двигателем мощности, и угла ориентации корпуса относительно опорного направления. Ошибки измерений вектора ветра, связанные с различным ракурсом и парусностью конструкции, компенсируются за счет вращения беспилотного летательного аппарата вокруг вертикальной оси с последующим усреднением накопленных данных.

Ключевые слова: БПЛА, беспилотный летательный аппарат, мультикоптер, измерение скорости ветра, скорость ветра, направление ветра

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-11-2021-035 от 24.06.2021.

Для цитирования: Попов Ю. Б., Корнаков А. П., Попова К. Ю., Макаров Е. В. Определение скорости и направления ветра с помощью беспилотного летательного аппарата // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 52–59. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-52-59.

Original article

MEASURING WIND VELOCITY USING UNMANNED AERIAL VEHICLE

Yuri B. Popov^{1✉}, **Anton P. Kornakov**², **Kseniya Yu. Popova**³, **Evgeniy V. Makarov**⁴

^{1, 2, 3, 4} Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

¹ iurii.b.popov@tusur.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-1627-2188>

² deidara2074@gmail.com

³ dku81@mail.ru

⁴ evmakarov@yahoo.com

Abstract. The article discusses a method for determining the wind velocity values at a desired point of the atmospheric boundary layer using a multicopter unmanned aerial vehicle. Wind velocity is calculated via a multicopter in hovering mode at a target point using current measurements of the thrust vector angle, the power consumed by each engine, and the angle of the frame orientation relative to the boresight. Wind vector measurement errors associated with different angles and windage of the body are compensated by rotating the unmanned aerial vehicle around the vertical axis with subsequent averaging of the accumulated data.

Keywords: UAV, unmanned aerial vehicle, multicopter, wind speed measurement, wind speed, wind direction

Funding: the study is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement No. 075-11-2021-035 of June 24, 2021.

For citation: Popov Yu. B., Kornakov A. P., Popova K. Yu., Makarov E. V. Measuring wind velocity using unmanned aerial vehicle. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):52–59. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-52-59.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из интенсивно развивающихся научно-технических направлений в последнее время стало конструирование, производство и применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1–2]. Перечень приложений, в которых применяются БПЛА (или иначе дроны), затрагивает самые различные сферы человеческой деятельности, при этом список решаемых задач непрерывно расширяется. Одной из прикладных задач, в решении которой могут и должны быть использованы БПЛА, является метеорологические измерения параметров состояния атмосферы [3–8]. Такие измерения используют при краткосрочном прогнозировании погоды, что является востребованным для многих сфер жизнедеятельности человека. В частности, прогноз погоды необходим для задач агропромышленного комплекса, экологического мониторинга атмосферы над урбанизированными территориями, для решения специальных задач силовых структур и пр. При этом для достоверного предсказания метеоусловий необходимы оперативные измерения метеорологических величин в вертикальном профиле атмосферного пограничного слоя (АПС) на различных высотах, в различных районах, в разные моменты времени. Традиционно для таких измерений используют контактные методы (КМ), основанные на применении шаров-зондов, метеомачт, самолетов, аэростатов. Очевидно, что перечисленные технические средства не соответствуют современным требованиям оперативности, периодичности, точности и территориальному охвату метеонаблюдений. Наиболее перспективным для измерений вертикальных профилей метеорологических величин в АПС является использование БПЛА на базе мультироторных аэромобильных платформ (МАП) – мультикоптеров. Высокая стабильность в полете, устойчивость к ветровым нагрузкам, наличие программируемых бортовых навигационных устройств позволяют использовать данный тип БПЛА в широком диапазоне метеорологических условий, в любое время суток, в режиме ручного управления оператором или автономно с использованием полетного контроллера с запрограммированным маршрутом. Осна-

щение МАП блоком метеорологических датчиков позволяет проводить контактные измерения вертикального профиля в АПС при каждом подъеме и спуске аппарата.

К сожалению, при достаточно широком выборе датчиков для измерения основных метеорологических величин (температура, давление, влажность) в настоящее время пока не существует малогабаритных устройств, обеспечивающих оперативное измерение характеристик ветра на борту МАП. Здесь под ветром понимается горизонтальное перемещение воздушных масс относительно земной поверхности [3, 5]. При этом текущее значение скорости ветра в некоторой точке АПС определяется двумя компонентами: собственно модулем скорости ветра и его направлением. Существующая вертикальная составляющая вектора ветра в данной работе не рассматривается.

Как правило, измерение компонент вектора ветра осуществляется опосредованно через внешний контроль текущего положения несущей платформы (с помощью радаров и лидаров) либо по данным бортовых навигационных устройств, обеспечивающих оценку параметров движения платформы на основе спутниковой навигации (GNSS). Анализ научных публикаций, а также патентный поиск показали, что вопросу определения скорости и направления ветра с помощью БПЛА уделяется большое внимание [9–12]. Это свидетельствует об актуальности задач развития и совершенствования методов измерения текущих компонент вектора ветра непосредственно на борту БПЛА.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основе [9–12] авторами был разработан новый метод измерения скорости и направления ветра с помощью БПЛА мультироторного типа. В данном случае рассматривается квадрокоптер, т. е. мультикоптер, оснащенный четырьмя двигателями. Метод предполагает, что на борту БПЛА установлен стандартный набор навигационного оборудования: приемник системы GNSS, гироскоп, компас. Кроме этого, установлены: датчики для измерения мощности, потребляемой каждым маршевым электродвигателем квадрокоптера в текущий

момент времени, а также бортовой вычислитель (контроллер) для обработки измеряемых данных.

Процесс измерения начинается с предварительного вывода БПЛА в определенную точку пространства вручную либо по про-

грамме, заранее заложенной в полетный контроллер. После чего квадрокоптер переводят в режим удержания заданных координат: высоты, широты и долготы (рис. 1). Продольную ось аппарата ориентируют в направлении на север (рис. 2).

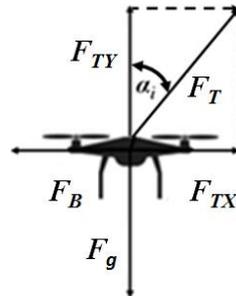


Рис. 1. Силы, действующие на БПЛА в режиме зависания

Примечание: составлено авторами.

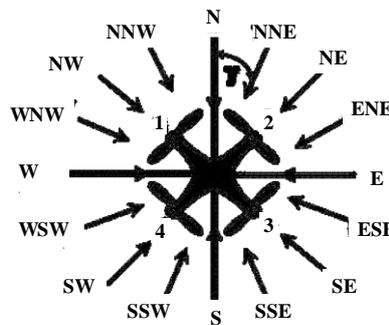


Рис. 2. Диаграмма относительного направления ветра

Примечание: составлено авторами.

После этого, по заданной программе, БПЛА начинает выполнять вращение в горизонтальной плоскости вокруг своей вертикальной оси. Вращение применяется для компенсации ошибок измерений, связанных с парусностью корпуса, которая меняется при различных ракурсах МАП по отношению к направлению ветра. Разница между направлением на север и положением продольной оси аппарата рассматривается как текущий курсовой угол γ (рис. 2). Вращение выполняется по часовой стрелке до завершения полного оборота. При этом курсовой угол БПЛА изменяется с шагом $22,5^\circ$ (рис. 2) и принимает следующие значения: $0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ, \dots, 337,5^\circ$. Очевидно, что за полный оборот количество угловых положений мультикоптера γ_i составит ($i = 1, 2, 3 \dots M$), где $M = 16$. Для каждого углового положения γ_i измеряются и вносятся

в память бортового вычислителя навигационные параметры, представленные на рис. 1–2. Измеренные величины используются для расчета направления и скорости ветра в текущей точке пространства.

Детальный алгоритм расчета элементов скорости ветра представлен ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчета модуля скорости ветра использован следующий подход.

На рис. 1 показаны силы, действующие на квадрокоптер в режиме удержания заданных координат (в режиме зависания).

Здесь F_T – сила тяги двигателей; F_g – сила тяжести; F_B – сила, с которой ветер воздействует на аппарат; F_{TX} – сила горизонтального уравнивания; F_{TY} – сила вертикального уравнивания; α_i – угол наклона вектора тяги.

Очевидно, что в режиме зависания БПЛА в заданной точке пространства сила тяги F_T должна компенсировать силу тяжести F_g и силу ветра F_B . Соответственно, вектор F_T можно разложить на две ортогональные составляющие F_{TX} и F_{TY} . Из рис. 1 следует, что составляющая F_{TX} уравнивает силу ветра F_B и является проекцией силы тяги F_T на горизонтальную плоскость:

$$F_{TX} = F_T \times \sin \alpha_i, \quad (1)$$

где α_i – текущий угол наклона вектора тяги при очередном повороте i мультикоптера в горизонтальной плоскости.

При этом F_{TX} связана с силой ветра простым соотношением:

$$F_B = -F_{TX}. \quad (2)$$

Также из рис. 1 следует, что в режиме зависания и удержания координат значение вектора тяги БПЛА пропорционально силе тяжести, что может быть представлено следующим образом:

$$F_{TY} = -F_g, \quad (3)$$

$$F_T = F_{TX} \times (\cos \alpha_i)^{-1} = -F_g \times (\cos \alpha_i)^{-1}. \quad (4)$$

Откуда из (1) следует:

$$F_{TX} = -F_g \times \frac{\sin \alpha_i}{\cos \alpha_i} = -F_g \times \operatorname{tg} \alpha_i, \quad (5)$$

а из (2):

$$F_B = F_g \times \operatorname{tg} \alpha_i. \quad (6)$$

В соответствии со вторым законом Ньютона связь между силой ветра и его скоростью может быть задана следующим выражением [13]:

$$F_B = mA_{xi} = m\dot{V}_i, \quad (7)$$

где $A_{xi} = \dot{V}_i = \frac{dV_i}{dt}$ – ускорение, соответствующее угловой ориентации γ_i ($i = 1, 2, 3 \dots M$);

V_i – модуль скорости ветра, соответствующий текущей угловой ориентации БПЛА γ_i в горизонтальной плоскости (рис. 2).

При условии $F_g = mg$ из выражений (6) и (7) следует:

$$F_B = mg \times \operatorname{tg} \alpha_i = mA_{xi}, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения.

Из (8) следует, что:

$$A_{xi} = g \times \operatorname{tg} \alpha_i. \quad (9)$$

Интегрируя левую и правую части уравнения (9) по dt , определим модуль горизонтальной составляющей скорости ветра для текущей угловой ориентации γ_i :

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i} A_{xi} dt = \int_{t_{i-1}}^{t_i} (g \times \operatorname{tg} \alpha_i) dt = g \times \operatorname{tg} \alpha_i \times \Delta T_i. \quad (10)$$

Из (7) и (10) следует:

$$V_i = g \times \operatorname{tg} \alpha_i \times \Delta T_i, \quad (11)$$

где $\Delta T_i = t_i - t_{i-1}$ – время поворота БПЛА между двумя последовательными угловыми положениями γ_{i-1} и γ_i .

Расчет модуля скорости ветра за полный оборот квадрокоптера вокруг своей оси выполняется по общеизвестной формуле усреднения [14]:

$$\bar{V} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (g \times \operatorname{tg} \alpha_i \times \Delta T_i), \quad (12)$$

где \bar{V} – среднее для совокупности значений V_i .

В свою очередь, направление ветра (откуда дует) может быть определено по соотношению мощности W_{ij} , потребляемой каждым двигателем в режиме зависания. Очевидно, что для компенсации скорости ветра и горизонтального смещения БПЛА полетный контроллер выполняет перераспределение мощности, потребляемой маршевыми двигателями. При этом обеспечивается требуемый угол наклона вектора тяги α_i (рис. 1). На рис. 2. показаны размещение и нумерация двигателей ($j = 1, 2, 3, 4$) и относительное направление ветра без привязки к абсолютному направлению оси БПЛА (курсовой угол). Символы для направления, откуда дует ветер, соответствуют общепринятым обозначениям сторон света по компасу. Если рассмотреть мгновенное соот-

ношение мощностей двигателей W_{ij} , можно составить таблицу логического соответствия

комбинации мощностей и относительного направления вектора β_i ; (таблица).

Таблица

Определение относительного направления ветра по соотношению мощности, потребляемой двигателями

Относительное направление ветра, β	Соотношение потребляемой двигателями мощности
N (0°)	$W_2 = W_4 > W_1 = W_3$
NNE ($22,5^\circ$)	$W_2 > W_4 > W_3 > W_1$
NE (45°)	$W_2 > W_3 = W_4 > W_1$
NEE ($67,5^\circ$)	$W_2 > W_3 > W_4 > W_1$
E (90°)	$W_3 = W_2 > W_1 = W_4$
SEE ($112,5^\circ$)	$W_3 > W_2 > W_1 > W_4$
SE (135°)	$W_3 > W_1 = W_2 > W_4$
SSE ($157,5^\circ$)	$W_3 > W_1 > W_2 > W_4$
S (180°)	$W_1 = W_3 > W_2 = W_4$
SSW ($202,5^\circ$)	$W_1 > W_3 > W_4 > W_2$
SW (225°)	$W_1 > W_3 = W_4 > W_2$
SWW ($247,5^\circ$)	$W_1 > W_4 > W_3 > W_2$
W (270°)	$W_1 = W_4 > W_3 = W_2$
NWW ($292,5^\circ$)	$W_4 > W_1 > W_2 > W_3$
NW (315°)	$W_4 > W_1 = W_2 > W_3$
NWW ($337,5^\circ$)	$W_4 > W_2 > W_1 > W_3$

Примечание: составлено авторами.

Истинное (полное) направление ветра находится как сумма относительного направления ветра и угла поворота корпуса БПЛА γ_i в горизонтальной плоскости (текущего курсового угла):

$$\theta_i = \beta_i + \gamma_i, \quad (13)$$

где θ_i – истинное (полное) направление ветра;

β_i – относительное направление ветра.

Среднее значение для направления ветра (13) за полный оборот БПЛА вокруг вертикальной оси рассчитывается по общеизвестной формуле усреднения [14]:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \theta_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\beta_i + \gamma_i). \quad (14)$$

Таким образом, выражения (12) и (14) определяют усредненные значения составляющих вектора горизонтального ветра в точке с заданными координатами. Меняя высоту полета БПЛА с определенным шагом, можно выполнить измерения ветра в требуемом вертикальном профиле АПС.

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма, в соответствии с которым выполняются

измерения навигационных параметров, расчет скорости и направления ветра.

Алгоритм определяет последовательность операций, которые выполняются начиная с предполетной подготовки МАП. На первом этапе (Блок 1) необходимо участие оператора, который закладывает в бортовой компьютер МАП данные маршрута. При этом основными характеристиками являются координаты точек, в которых будут выполняться измерения. После старта МАП процесс выполняется автоматически по заложенной программе (Блок 2).

Очевидно, что для измерений скорости и направления ветра в вертикальном профиле АПС точки маршрута должны иметь одинаковые координаты в горизонтальной плоскости (точка привязки на поверхности земли) и отличаться по высоте. Особенностью предложенной методики является то, что в процессе измерений МАП не смещается относительно заданной точки привязки (Блок 3). Это позволяет исключить энергозатраты, связанные с перемещением БПЛА по ветру и возврат в исходную точку, как реализовано в методиках [9, 10].

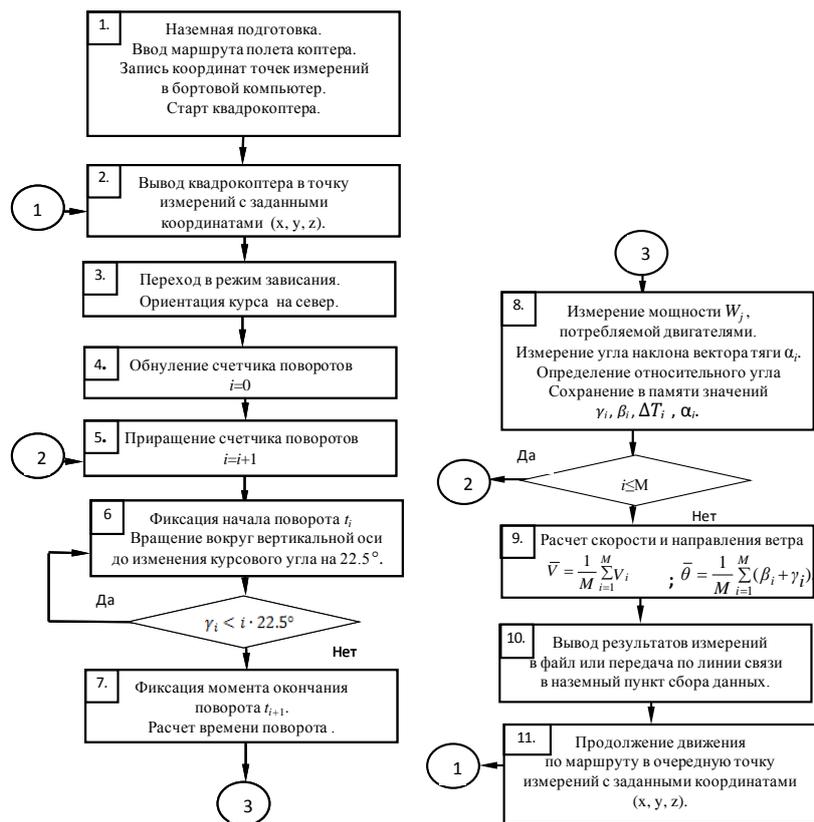


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета скорости и направления ветра

Примечание: составлено авторами.

В момент начала измерений для конкретной фиксированной высоты выполняется обнуление ($i = 0$) счетчика угловых поворотов (Блок 4). Далее в режиме зависания выполняется вращение МАП вокруг своей вертикальной оси. Вращение вызвано необходимостью компенсации ошибок, связанных с парусностью корпуса, которая изменяется при различных ракурсах МАП по отношению к направлению ветра. Для каждого углового поворота значение счетчика увеличивается на единицу (Блок 5). Поворот корпуса выполняется с шагом $22,5^\circ$. Время начала (Блок 6) и окончания (Блок 7) каждого поворота фиксируется. По окончании каждого поворота в память бортового компьютера записывается затраченное время ΔT_i , а также текущие значения навигационных параметров и потребляемая двигателями мощность (Блок 8). Полный оборот вокруг оси совершается за шестнадцать шагов ($M = 16$). После этого процесс вращения прекращается и рассчитываются усредненные значения скорости и направления ветра (Блок 9). Результаты расчетов со-

храняются в виде структурированного файла в памяти либо передаются на землю по каналу связи. Структура файла предполагает привязку данных к координатам и времени измерений (Блок 10). Далее МАП выполняет перемещение в очередную точку маршрута (Блок 11) и процесс измерения повторяется. После прохождения всего маршрута МАП автоматически возвращается в заданную точку посадки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно констатировать следующее:

1. Рассмотренный подход обеспечивает минимизацию энергии, затрачиваемой на перемещение МАП по маршруту. Согласно методике, квадрокоптер движется вертикально с зависанием в точках на высотах, заданных в маршруте. При этом общий путь, который проходит МАП, и время реализации однократного измерения меньше чем в [9, 10].

2. Направление ветра определяется с помощью логического анализа соотношения мощностей, потребляемых двигателями. Этот

подход можно считать универсальным, поскольку возможны варианты применения других контрольных величин, опосредованно связанных с мощностью. Например, без существенных ограничений в процедуре сравнения можно использовать значения сигналов управления двигателями, задающих частоту вращения.

3. В работе рассмотрен вариант определения направления ветра с усреднением по 16 измерениям. Количество измерений можно

сократить до 4 при выборе шага поворота 90° . В этом случае уменьшается общее время измерения за оборот и сохраняется возможность компенсации ошибки, связанной с разным ракурсом корпуса БПЛА по отношению к направлению ветра.

Дальнейшее развитие метода следует рассматривать в части исследований его точности и реализации в различных конструкциях дронов.

Список источников

1. Khan A. C., Alvi B. A., Safi E. A. et al. Drones for good in smart cities: A review. In: *Proceedings of the International Conference on Electrical, Electronics, Computers, Communications, Mechanical and Computing (EECCMC)*, January 28–29, 2018, India. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/316846331_Drones_for_Good_in_Smart_CitiesA_Review (дата обращения: 15.06.2023).
2. Floreano D., Wood R. J. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*. 2015;521(7553):460–466.
3. Расторгуев И. П. Беспилотные технологии мониторинга погодных условий // Гелиогеофизические исследования. 2014. № 8. С. 51–54.
4. Brosy C., Krampf K., Zeeman M. et al. Simultaneous multicopter-based air sampling and sensing of meteorological variables. *Atmos Meas Tech Discuss*. 2017;10:2773–2784.
5. Ситников Н. М., Акмулин Д. В., Борисов Ю. А. и др. Использование беспилотных летательных аппаратов для мониторинга атмосферы // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 90–99.
6. Chang C.-C., Chang C.-Y., Wang J.-L. et al. An optimized multicopter UAV sounding technique (MUST) for probing comprehensive atmospheric variables. *Chemosphere*. 2020;254:126867.
7. Кураков С. А., Зуев В. В. Беспилотный измеритель вертикальных профилей метеопараметров в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 994–999.
8. Popov Yu. B., Karpushin P. A., Krasnenko N. P. et al. Meteorological multi-rotor unmanned aerial complex and its application for monitoring of the atmosphere. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*. 2022;1040:012006.
9. Кураков С. А., Куракова П. С., Куракова О. А. и др. Способ определения усредненных значений горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра и его направления : патент 2650094С2 Рос. Федерация. № 2016119943 : заявл. 23.05.2016 ; опубл. 06.04.2018. URL: https://i.moscow/patents/RU2650094C2_20180406 (дата обращения: 15.06.2023).
10. Определение скорости движения воздуха. URL: <https://ivgpu.ru/images/docs/ob-universitete/instituty->

References

1. Khan A. C., Alvi B. A., Safi E. A. et al. Drones for good in smart cities: A review. In: *Proceedings of the International Conference on Electrical, Electronics, Computers, Communications, Mechanical and Computing (EECCMC)*, January 28–29, 2018, India. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/316846331_Drones_for_Good_in_Smart_CitiesA_Review (accessed: 15.06.2023).
2. Floreano D., Wood R. J. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*. 2015;521(7553):460–466.
3. Rastorguev I. P. Bepilotnye tekhnologii monitoringa pogodnykh uslovii. *Heliogeophysical Research*. 2014;(8):51–54. (In Russian).
4. Brosy C., Krampf K., Zeeman M. et al. Simultaneous multicopter-based air sampling and sensing of meteorological variables. *Atmos Meas Tech Discuss*. 2017;10:2773–2784.
5. Sitnikov N. M., Akmulin D. V., Borisov Yu. A. et al. Ispolzovanie bepilotnykh letatelnykh apparatov dlia monitoringa atmosfery. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2013;(1):90–99. (In Russian).
6. Chang C.-C., Chang C.-Y., Wang J.-L. et al. An optimized multicopter UAV sounding technique (MUST) for probing comprehensive atmospheric variables. *Chemosphere*. 2020;254:126867.
7. Kurakov S. A., Zuev V. V. Unmanned aerial vehicle for measuring vertical profiles of the meteorological parameters in the atmospheric boundary layer. *Optika atmosfery i okeana*. 2016;29(11):994–999. (In Russian).
8. Popov Yu. B., Karpushin P. A., Krasnenko N. P. et al. Meteorological multi-rotor unmanned aerial complex and its application for monitoring of the atmosphere. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*. 2022;1040:012006.
9. Kurakov S. A., Kurakova P. S., Kurakova O. A. et al. Method of the wind speed and its directions horizontal and vertical components averaged values determination. RU Patent 2650094C2. No. 2016119943, filed May 23, 2016, issued April 6, 2018. URL: https://i.moscow/patents/RU2650094C2_20180406 (accessed: 15.06.2023). (In Russian).
10. Opredelenie skorosti dvizheniya vozdukh. URL: <https://ivgpu.ru/images/docs/ob-universitete/instituty->

- fakultety-kafedry/ti/fakultety-kafedry/ftiim/tb/publi-katsii/opred-skorosty.pdf (дата обращения: 15.06.2023).
11. Кочин А. В., Трещалин А. П. Способ определения усредненного вектора скорости ветра с помощью беспилотного летательного аппарата : патент 2695698C1 Рос. Федерация. № 2018132992 ; заявл. 17.09.2018; опубл. 25.07.2019. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2695698C1> (дата обращения: 15.06.2023).
 12. Каплин А. Ю., Степанов М. Г. Способ определения скорости и направления ветра с использованием беспилотного летательного аппарата : патент 2744772C1 Рос. Федерация. № 2020127102 ; заявл. 12.08.2020 ; опубл. 15.03.2021. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2744772C1> (дата обращения: 15.06.2023).
 13. Маркеев А. П. Теоретическая механика. М. : ЧеРо, 1999. 572 с.
 14. Большаков В. Д. Теория ошибок наблюдений. М. : Недра, 1983, 223 с.
- fakultety-kafedry/ti/fakultety-kafedry/ftiim/tb/publi-katsii/opred-skorosty.pdf (accessed: 15.06.2023). (In Russian).
11. Kochin A. V., Treshchalin A. P. Method for determining averaged wind speed vector using an unmanned aerial vehicle. RU Patent 2695698C1. No. 2018132992, filed September 17, 2018, issued July 25, 2019. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2695698C1> (accessed: 15.06.2023). (In Russian).
 12. Kaplin A. Yu., Stepanov M. G. Method for determining wind speed and direction using unmanned aircraft. RU Patent 2744772C1. No. 2020127102, filed August 12, 2020, issued March 15, 2021. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2744772C1> (accessed: 15.06.2023). (In Russian).
 13. Markeev A. P. Teoreticheskaia mekhanika. Moscow: CheRo; 1999. 572 p. (In Russian).
 14. Bolshakov V. D. Teoriia oshibok nabljudenii. Moscow: Nedra; 1983. 223 p. (In Russian).

Информация об авторах

Ю. Б. Попов – кандидат технических наук, доцент.
А. П. Корнаков – студент.
К. Ю. Попова – кандидат физико-математических наук, доцент.
Е. В. Макаров – заведующий лабораторией.

Information about the authors

Yu. B. Popov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.
A. P. Kornakov – Student.
K. Yu. Popova – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.
E. V. Makarov – Head of the Laboratory.

Научная статья
УДК 004.056
DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-60-65

ОЦЕНИВАНИЕ КАЧЕСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ВРЕДНОСНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Сергей Игоревич Прудников

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Москва, Россия
prudnikovscience@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5136-8521>

Аннотация. В статье представлены выводы из анализа угроз, возникающих в результате распространения информации, способной оказать негативное психологическое воздействие. Рассмотрены современные механизмы выявления и блокировки вредоносной информации, сформирован математический аппарат оценивания качества ее автоматизированного обнаружения и создана функциональная модель информационно-технологических процессов анализа информационного ресурса на предмет наличия вредоносной информации.

Ключевые слова: вредоносная информация, информационный ресурс, обнаружение вредоносной информации

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ (грант НШ-122.2022.1.6).

Для цитирования: Прудников С. И. Оценка качества автоматизированного обнаружения вредоносной информации // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 60–65. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-60-65.

Original article

ASSESSING THE QUALITY OF AUTOMATED MALICIOUS INFORMATION DETECTION

Sergey I. Prudnikov

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
prudnikovscience@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5136-8521>

Abstract. The article presents findings of the analysis of threats arising due to the spread of information, which can have a negative impact on a person's psychological condition. Modern mechanisms for detection and blocking of malicious information are considered; a mathematical apparatus for assessing the quality of information detection is established; and a functional model of informational and technological processes for the examination of an information source for malicious information is designed.

Keywords: malicious information, information source, malicious information detection

Funding: the study is supported by the grant of the President of the Russian Federation in the framework of state support for leading research schools in the Russian Federation (grant NSh-122.2022.1.6).

For citation: Prudnikov S. I. Assessing the quality of automated malicious information detection. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):60–65. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-60-65.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день среднестатистический пользователь интернета в возрасте 12–17 лет ежедневно проводит в сети до 6 часов, а около 74 % из них посещают информационные ресурсы, содержащие информацию, запрещен-

ную для распространения среди детей [1]. Как показывает проведенный анализ, требования законодательства в области защиты детей от воздействия вредоносной информации, способной оказать негативное влияние на их здоровье и развитие, выполняются не в пол-

ной мере ввиду значительно расширившейся интернет-медиа-сферы и невозможности своевременного реагирования контролирующих и надзорных органов [2, 3]. Поэтому актуальным является совершенствование методических подходов к решению задач автоматизированного выявления такой информации для ее своевременного блокирования [4–6].

В основу исследования положен замысел использования системы автоматизированного обнаружения вредоносной информации, входными данными которой будет являться контент с медиасервисов (аудио- и видеоданные в потоковом и непотоковом режимах), возраст интернет-пользователей, особенности настройки доступа к ресурсам сети Интернет, а выходными – сведения о наличии запрещенного контента на посещенных ресурсах на основе установленных возрастных меток, список посещенных сайтов, демонстрирующий контент, запрещенный для пользователей определенных возрастных категорий, рекомендации по блокировке такого контента, список принудительно заблокированных интернет-ресурсов.

Цель исследования – математическая постановка задачи оценивания качества автоматизированного обнаружения вредоносной информации в медиасреде с учетом текущего уровня развития информационных технологий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Хранение большого объема исходных данных и результатов анализа информационных потоков требует создания баз данных, способных не только обеспечивать качественное хранение информации, но и оперативно ее обрабатывать и предоставлять доступ для решения поставленных задач [7–9].

1. Проблемы хранения информации

Исходя из опыта построения нейронных сетей, а также учитывая требования законодательства по защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию, требуется формирование баз данных, содержащих следующую информацию:

1. *Справочная база* (информация, имеющая характерный информационный окрас, свойственный информации, причиняющей вред здоровью и развитию детей): возрастные категории детей и присвоенные им метки доступа; список слов и сочетаний слов; изображения;

видео- и аудиоданные; обучающие, проверочные и тестовые наборы данных (датасеты).

2. *Исходные данные*: идентификатор пользователя автоматизированного рабочего места или мобильного устройства; возраст пользователя; особенности настройки доступа к интернет-ресурсам.

3. *Результаты функционирования*: список посещенных сайтов, демонстрирующих контент, запрещенный для детей различных возрастных категорий; рекомендации по присвоению возрастных меток информационным ресурсам; список принудительно заблокированных интернет-ресурсов.

4. Выявление вредоносной информации, причиняющей вред здоровью и развитию детей, предполагает формирование математического аппарата, способного обеспечивать адекватное функционирование разрабатываемого программного обеспечения (ПО) с заданными показателями качества.

2. Квалиметрия автоматизированного обнаружения вредоносной информации

В квалиметрии под оцениванием качества понимается особый тип деятельности, направленной на формирование ценностных суждений об объекте оценивания, под которым подразумеваются качество, определенные подмножества свойств или отдельное качество [10].

Исходя из этого оценка качества представляет собой результат взаимодействия четырех компонентов:

$$M = \{S, Ob, B, A\}, \quad (1)$$

где S – субъект оценивания;

Ob – объект оценивания;

B – база сравнения;

A – алгоритм оценивания.

В классическом рассмотрении в роли субъекта оценивания S может выступать как один эксперт, так и экспертная группа (сообщество). Порядок формирования таких групп и организации их функционирования рассмотрены в [11]. Применительно к теме исследования в роли субъекта оценивания выступает специализированное ПО, разработанное с применением технологий искусственного интеллекта и предназначенное для выявления вредоносной информации в информационных ресурсах различного назначения и режима функционирования.

Так как объект оценивания может включать в себя простые информационные объекты, такие как звук, изображение, текстовое описание и т. д., то для формализации S представим его в виде пространства субъекта оценивания S в теоретико-множественном смысле со структурой отношений в нем \wedge_S , раскрывающей взаимосвязь между простыми информационными объектами, устанавливаемую в процессе оценивания. В таком случае субъект оценивания S конкретизируется путем представления формальных объектов двух видов $\langle S, \wedge_S \rangle$.

Под объектом оценивания Ob понимается информационный ресурс, в котором оценивается качество выявления вредоносной информации. Каждому рассматриваемому объекту соответствует пространство качеств R со структурой отношений в нем \wedge_R . При этом каждому качеству соответствует пространство свойств Γ со структурой отношений в нем \wedge_Γ . Измерение качества переводит пространство свойств в пространство показателей качества, или на языке мер – в пространство мер качества M с соответствующей ему структурой отношений в пространстве мер \wedge_M [12].

Таким образом, объект оценивания можно представить тремя формальными объектами:

$$Ob = \langle \langle R, \wedge_R \rangle, \langle \Gamma, \wedge_\Gamma \rangle, \langle M, \wedge_M \rangle \rangle. \quad (2)$$

Базу сравнения B можно представить одной или несколькими базами сравнений, что позволяет ее формализовать с помощью теоретико-множественного пространства баз сравнения и конкретизировать в зависимости от содержания в виде группы аналогов, систем эталонов и нормативов качества.

Алгоритм оценивания A основывается на множестве операторов оценивания и соответствующим ему формализованном пространстве операторов оценивания θ . Множество операторов оценивания θ основано на логике сравнения L и использует заданные методы оценивания K . Результатом оценивания является оценка качества OK , при этом множеству OK соответствует пространство оценок O [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая изложенное, система оценивания S_{OK} описывается многокомпонентным кортежем вида:

$$S_{OK} = \{ \langle S, \wedge_S \rangle, \langle R, \wedge_R \rangle, \langle \Gamma, \wedge_\Gamma \rangle, \langle M, \wedge_M \rangle, B, \theta, O \}. \quad (3)$$

Для дальнейшей работы введем понятие показателя качества выявления вредоносной информации. Пусть под мерой качества выявления вредоносной информации (μ) в информационном ресурсе (массиве, потоке, отдельных файлах) понимается отображение качества системы M или подмножества – отдельных ключевых свойств системы или их групп $\{m_i\} \subset M$ на множество вещественных чисел M_e :

$$\mu: M \rightarrow M_e \text{ или } \mu: \{m_i\} \rightarrow M_e. \quad (4)$$

Для представления (1) в семантическом виде заменим множество вещественных чисел M_e множеством семантических единиц S_e . Таким образом, имеем выражение вида:

$$s: M \rightarrow S_e \text{ или } s: \{m_i\} \rightarrow S_e. \quad (5)$$

Представим систему автоматизированного обнаружения вредоносной информации в структурном виде (рис. 1).

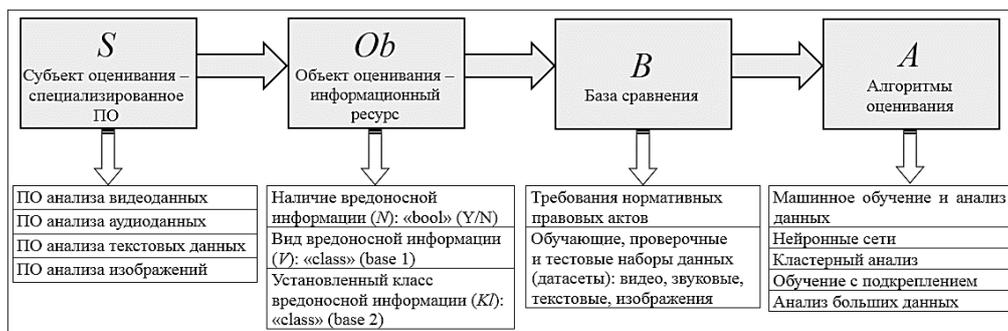


Рис. 1. Структурный вид системы автоматизированного обнаружения вредоносной информации
 Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Исходя из описанной логики, в процессе оценивания (анализа) производится определение наличия вредоносной информации (*N*), вида вредоносной информации (*V*) и ее классификация с отнесением к одному из классов (*KI*) в соответствии с федеральным законодательством.

В связи с тем, что процесс анализа информационных ресурсов является технически сложным и ресурсоемким, для его всесторон-

него моделирования целесообразно использовать нотацию Росса (IDEF0), основанную на концепции системного моделирования и предназначенную для описания сложных систем. На рис. 2 представлена функциональная модель информационно-технологических процессов анализа информационного ресурса на предмет наличия вредоносной информации, причиняющей вред здоровью и развитию детей.

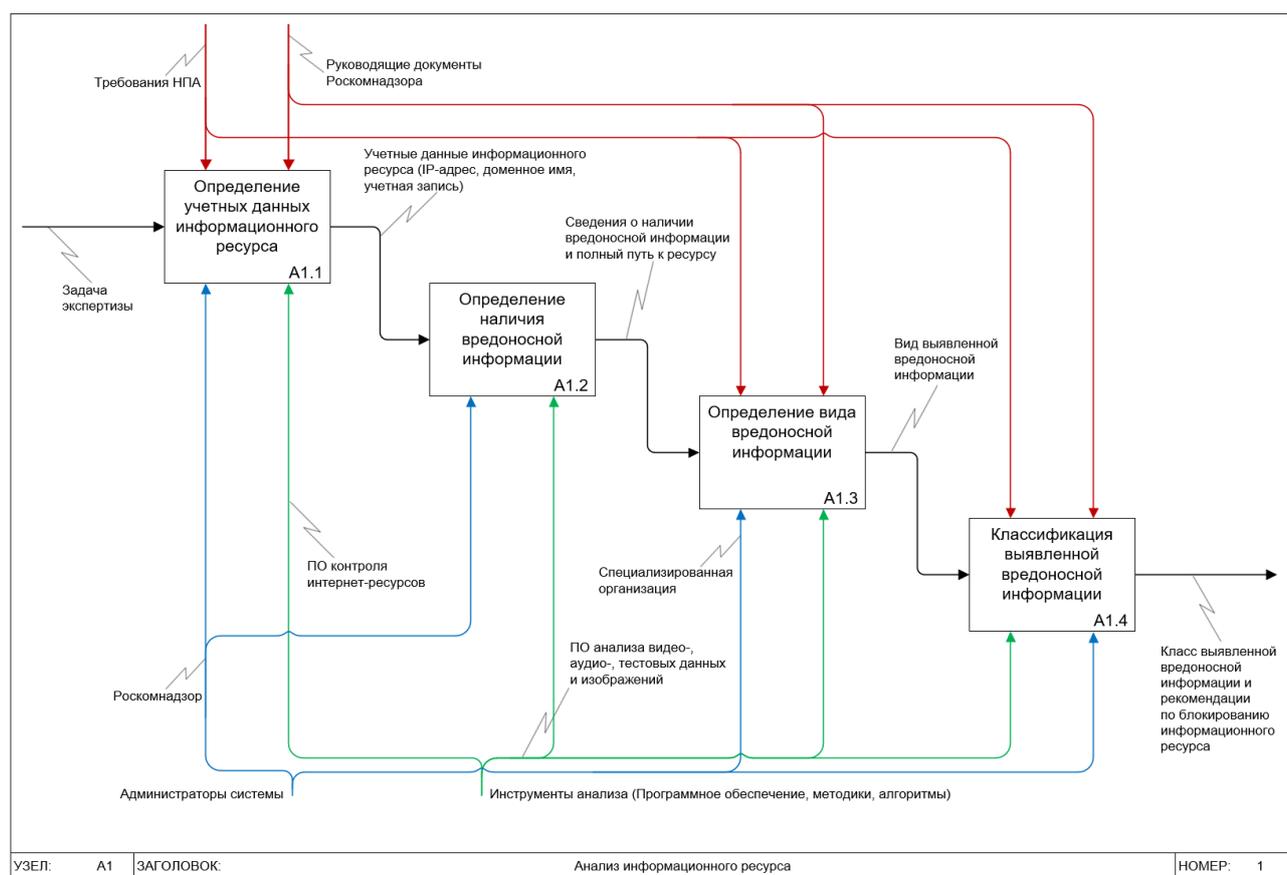


Рис. 2. Функциональная модель

Примечание: составлено автором на основании данных, полученных в исследовании.

Представленная функциональная модель анализа информационного ресурса на предмет наличия вредоносной информации в нотации IDEF0 определяет последовательность операций по выявлению вредоносной информации и ее классификации, а также механизмы, необходимые для качественного решения поставленной задачи на всех уровнях модели. Вместе с тем построение адекватной имитационной модели бизнес-процессов в системе автоматизированного выявления вредоносной информации требует перехода от описания системы

в IDEF0 к дискретно-событийной модели с использованием аппарата систем массового обслуживания [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ показал, что защита детей и подростков от воздействия вредоносной информации требует комплексного применения современных информационных технологий, способных осуществлять поиск, выявление

ние, классификацию и адресную блокировку вредоносных информационных ресурсов с заданными показателями качества.

2. Определен вид системы автоматизированного обнаружения вредоносной информации, учитывающий требования нормативных правовых актов по защите детей и подростков от воздействия вредоносной информации, а также возможности современных информационных технологий.

3. Сформирован и обоснован математический аппарат оценивания качества автома-

тизированного обнаружения вредоносной информации, разработана функциональная модель информационно-технологических процессов анализа информационного ресурса на предмет наличия вредоносной информации. Для повышения качества дальнейшей работы требуется переход от описания системы в IDEF0 к дискретно-событийной модели с использованием аппарата систем массового обслуживания, что позволит разработать инструментарий для выработки и оценивания управленческих решений.

Список источников

1. Медиапотребление 2022. URL: https://media.scope.net/upload/iblock/883/f11rt3k24o0ju2jkak4v0s0wr836wobp/MEDIAPOTREBLENIE_DIGITAL_14092022.pdf (дата обращения: 11.01.2023).
2. Симонова В. А., Лифинцева Е. А. Защита несовершеннолетних от негативной информации в Интернет // Научные известия. 2022. № 26. С. 128–131.
3. Титор С. Е., Каменева Т. Н. Деструктивное влияние интернета на поведение несовершеннолетних: результаты эмпирического исследования // Caucasian Science Bridge. 2022. Т. 5, № 4. С. 126–135.
4. Богомолов А. В., Чуйков Д. С., Запорожский Ю. А. Средства обеспечения безопасности информации в современных автоматизированных системах // Информационные технологии. 2003. № 1. С. 2–8.
5. Аветисян А. И. Кибербезопасность в контексте искусственного интеллекта // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92, № 12. С. 1119–1123. DOI 10.31857/S0869587322120039.
6. Мамченко М. В., Мещеряков Р. В., Галин Р. Р. и др. Социокиберфизическая система для выявления и блокирования деструктивного Интернет-контента // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы 18-й Междунар. молодежной науч.-технич. конф., 10–14 октября 2022 г., г. Севастополь. Севастополь : Севастопол. гос. ун-т., 2022. С. 159.
7. Иванов А. А., Богомолов А. В. Архитектура гетерогенной информационной среды интеграции информационных ресурсов предприятий, решающих задачи инвестирования в человеческий капитал // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 8. С. 76–79.
8. Мещеряков Р. В., Исхаков С. Ю. Исследование индикаторов компрометации для средств защиты информационных и киберфизических систем // Вопросы кибербезопасности. 2022. № 5. С. 82–99. DOI 10.21681/2311-3456-2022-5-82-99.
9. Тобин Д. С., Голосовский М. С., Богомолов А. В. Технология обеспечения достоверности информации при проведении сетевых экспертиз // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2020. Т. 16, № 3. С. 623–632.

References

1. Mediapotreblenie 2022. URL: https://media.scope.net/upload/iblock/883/f11rt3k24o0ju2jkak4v0s0wr836wobp/MEDIAPOTREBLENIE_DIGITAL_14092022.pdf (accessed: 11.01.2023). (In Russian).
2. Simonova V. A., Lifintseva E. A. Protecting children from negative information on the internet. *Scientific News*. 2022;(26):128–131. (In Russian).
3. Titor S. E., Kameneva T. N. Destructive influence of the Internet on behavior of minors: Results of empirical study. *Caucasian Science Bridge*. 2022;5(4):126–135. (In Russian).
4. Bogomolov A. V., Chuikov D. S., Zaporozhsky Yu. A. Sredstva obespecheniia bezopasnosti informatsii v sovremennykh avtomatizirovannykh sistemakh. *Information Technologies*. 2003;(1):2–8. (In Russian).
5. Avetisyan A. I. Kiberbezopasnost v kontekste iskusstvennogo intellekta. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2022;92(12):1119–1123. DOI 10.31857/S0869587322120039. (In Russian).
6. Mamchenko M. V., Meshcheryakov R. V., Galin R. R. et al. Socio-cyberphysical system for detecting and blocking destructive internet content. In: *Proceedings of the 18th International Young Scientists Conference "Modern Issues in Radioelectronics and Telecommunications "RT – 2022"*, October 10–14, 2022, Sevastopol. Sevastopol: Sevastopol State University; 2022. p. 159. (In Russian).
7. Ivanov A. A., Bogomolov A. V. Architecture of heterogeneous information environment for integration of information resources of enterprises solving problems of investing in human capital. *MMTT*. 2022;(8):76–79. (In Russian).
8. Meshcheryakov R. V., Iskhakov S. Yu. Study of compromation indicators for improvement of information and cyberphysical systems protection facilities. *Voprosy kiberbezopasnosti*. 2022;(5):82–99. DOI 10.21681/2311-3456-2022-5-82-99. (In Russian).
9. Tobin D. S., Golosovsky M. S., Bogomolov A. V. Technology for ensuring the accuracy of information during network examinations. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2020;16(3):623–632. (In Russian).

10. Шапошников В. А. Квалиметрия. Екатеринбург : Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2016. 134 с.
11. Прудников С. И., Котляр А. В. Метод формирования ведомственных сетевых экспертных сообществ // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 3. С. 104–107. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_3_104.
12. Субетто А. И. Квалиметрия: малая энциклопедия. Вып. 1. СПб. : ИПЦ СЗИУ – фил. РАНХиГС, 2015. 244 с.
13. Вечеркин В. Б., Галанкин А. В., Прохоров М. А. Методика оценивания устойчивости функционирования автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктурой в условиях информационного воздействия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 6. С. 160–170.
14. Тихонов С. В. Методика перехода от IDEF0 к модели в терминах теории систем массового обслуживания при исследовании бизнес-процессов организации // Управление большими системами. 2008. Вып. 21. С. 5–15.
10. Shaposhnikov V. A. Kvalimetriia. Yekaterinburg: Publishing House of the Russian State Vocational Pedagogical University; 2016. 134 p. (In Russian).
11. Prudnikov S. I., Kotlyar A. V. Method of forming departmental network expert communities. *MMTT*. 2023(3):104–107. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_3_104. (In Russian).
12. Subetto A. I. Kvalimetriia: malaia entsiklopediia. Is. 1. St. Petersburg: Publishing House of the North-West Institute of Management – Branch of the RANEPА; 2015. 244 p. (In Russian).
13. Vecherkin V. B., Galankin A. V., Prokhorov M. A. The methods for estimation of sustainability operation of automated control system of critical information infrastructure in the conditions of information influence. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2018;(6):160–170. (In Russian).
14. Tikhonov S. V. Metodika perekhoda ot IDEF0 k modeli v terminakh teorii sistem massovogo obsluzhivaniia pri issledovanii biznes-protsessov organizatsii. *Large-Scale Systems Control*. 2008;21:5–15. (In Russian).

Информация об авторе

С. И. Прудников – кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Information about the author

S. I. Prudnikov – Candidate of Sciences (Engineering), Senior Researcher.

Научная статья
УДК 669.162.252.428
DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-66-75

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКИ КАПЛИ ОКАЛИНОМАСЛОСОДЕРЖАЩЕГО ШЛАМА ПРИ ЕЕ ДВИЖЕНИИ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ ГАЗА

**Николай Николаевич Синицын¹, Наталья Владимировна Запатрина²,
Ирина Анатольевна Сарычева³, Юлия Владимировна Грибкова^{4✉},
Елена Викторовна Голицына⁵, Юлия Викторовна Донцова⁶**

^{1, 6} Череповецкий государственный университет, Череповец, Россия

^{1, 2, 3, 4, 5} Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники Минобороны России,
Череповец, Россия

¹ nnsinitcyn@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>

² z_natalia777@mail.ru

³ sariranat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8925-209X>

⁴ 150475@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-2370-1251>

⁵ e_golitsyna@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9602-2114>

⁶ iuvdontcova@chsu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0647-3703>

Аннотация. В статье представлены исследования траектории движения одиночной жидкой капли шлама, содержащего воду, масло и железную окалину, в закрученном потоке высокотемпературного газа. Определены температурные поля в капле с учетом двухфазной зоны перехода воды из жидкого состояния в паровое, алгоритм расчета траектории движения капли в закрученном потоке газа при ее прогреве с учетом двухфазной зоны испарения воды. Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать характерные размеры камеры сушки капель окалиномаслосодержащих шламов при ее проектировании, а также управлять процессом сушки капель, получающихся при дисковом распыле.

Ключевые слова: капля окалиномаслосодержащих шламов, высокотемпературная сушка, закрученный газовый поток, фазовый переход влаги

Для цитирования: Синицын Н. Н., Запатрина Н. В., Сарычева И. А., Грибкова Ю. В., Голицына Е. В., Донцова Ю. В. Математическое моделирование высокотемпературной сушки капли окалиномаслосодержащего шлама при ее движении в закрученном потоке газа // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 66–75. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-66-75.

Original article

MATHEMATICAL SIMULATION OF HIGH-TEMPERATURE DRYING OF A DROP OF SCALE- AND OIL-CONTAINING SLUDGE WHEN MOVING IN A SWIRLING GAS FLOW

**Nikolay N. Sinitsyn¹, Natalya V. Zapatrina², Irina A. Sarycheva³,
Yuliya V. Gribkova^{4✉}, Elena V. Golitsyna⁵, Yuliya V. Dontsova⁶**

^{1, 6} Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

^{1, 2, 3, 4, 5} Military Order of Zhukov University of Radio Electronics, Cherepovets, Russia

¹ nnsinitcyn@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>

² z_natalia777@mail.ru

³ sariranat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8925-209X>

⁴ 150475@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-2370-1251>

⁵ e_golitsyna@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9602-2114>

⁶ iuvdontcova@chsu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0647-3703>

Abstract. The article presents an examination of the movement trajectory of a single liquid drop of sludge containing water, oil, and iron scale in a swirling high-temperature gas flow. Taking into account a two-phase transition area from liquid water to vapor, temperature fields in a drop are determined, as is an algorithm for calculating the movement trajectory of a drop in a swirling gas flow when heating it up according to a two-phase area of water evaporation. When designing a drying chamber for drops of scale- and oil-containing sludge, a mathematical model helps predict its typical size as well as control the drying process for drops produced by a disk atomizer.

Keywords: a drop of scale- and oil-containing sludge, high-temperature drying, swirling gas flow, moisture phase transition

For citation: Sinitsyn N. N., Zapatrina N. V., Sarycheva I. A., Gribkova Yu. V., Golitsyna E. V., Dontsova Yu. V. Mathematical simulation of high-temperature drying of a drop of scale- and oil-containing sludge when moving in a swirling gas flow. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):66–75. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-66-75.

ВВЕДЕНИЕ

На металлургических предприятиях обрабатывается большой объем разнообразных по составу и концентрации загрязняющих веществ сточных вод, в том числе содержащих масло и окалину. Обработка их в системах водочистки приводит к образованию другого вида отходов – окалиномаслосодержащих шламов. Часть отходов представляет собой мелкодисперсные маслосодержащие шламы. Состав шламов, взятых из вторичных отстойников, колеблется в следующих пределах: вода 23–32 %, масло 15–31 %, твердые составляющие 38–60 %. Твердые фракции шламов практически полностью состоят из окалины и по химическому составу представляют собой смесь оксидов железа [1]. Содержание железа в сухой части шлама составляет 72 % [2–4]. Средняя истинная плотность окалины – 5 392 кг/м³, насыпная плотность – 2 703 кг/м³. Степень утилизации таких отходов не превышает 75 %. Установлено, что при полном испарении воды капля переходит в твердое состояние [5].

В [6] представлен алгоритм расчета и выполнено численное исследование тепломассообмена в закрученном газокапельном течении, аппарат со взвешенным слоем для концентрирования термолабильных жидкостей. Экспериментальное исследование испарения капель распыленного потока суспензий на основе воды [7] показало значительное влияние примесей на основную характеристику испарения – относительное изменение радиуса капель.

Целью представленной работы является исследование температурного поля одиночной капли окалиномаслосодержащего шлама

при ее движении в закрученном высокотемпературном потоке газа с учетом испарения влаги и определение траекторий движения, необходимых при прогнозировании характерных размеров распылительной камеры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка задачи. Принципиальную схему распылительной камеры можно представить в виде цилиндра 4, ограниченного двумя торцевыми поверхностями, к внутренней поверхности 3 которого тангенциально вводится газ через сопло 6, и отработанный газ отводится через патрубок 5 (рис. 1а).

Аэродинамика закрученного потока отличается большой сложностью и пространственностью. В любой точке вектор скорости можно разделить на три составляющие: тангенциальную w_ϕ , аксиальную w_z и радиальную w_r . Объем закрученного потока можно условно разделить на три области: осесимметричное ядро потока, состоящее из внутренней и внешней областей, приторцевые зоны течения и периферийную пристенную зону. Ядро потока занимает основную часть рабочего объема камеры. Внешней границей ядра потока является цилиндрическая поверхность радиусом r_γ . В пределах ядра потока тангенциальная составляющая скорости имеет наибольшую из всех трех компонент величину. В соответствии с характером ее распределения по радиусу можно выделить две зоны: зону возрастания скорости w_ϕ при уменьшении радиуса (квазипотенциальную зону) и зону ее падения по мере приближения к центру камеры (зону квазитвердого вращения) (рис. 1б).

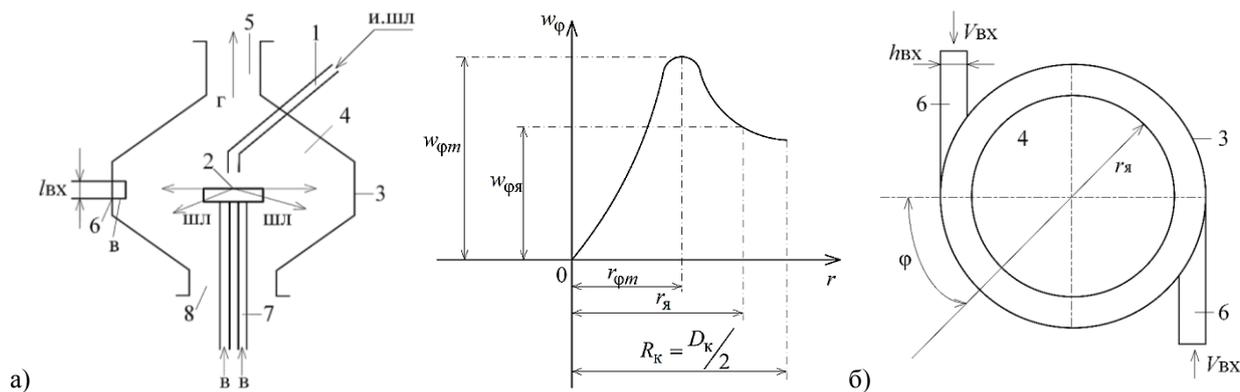


Рис. 1. Принципиальная схема распылительной камеры и распределение тангенциальной скорости:
 1 – канал подачи исходного продукта; 2 – вращающийся диск; 3 – стенка распылительной камеры;
 4 – цилиндр, представляющий распылительную камеру; 5 – патрубок выхода отработавшего газа;
 6 – тангенциальное сопротивление горячего газа;
 7 – подача холодного воздуха для охлаждения диска 2; 8 – канал удаления затвердевшего шлама;
 φ – угол; в – воздух; и. шл. – исходный шлам; шл. – капли шлама

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

При двух- и более стороннем вводе потока течение в ядре практически осесимметрично. Аэродинамическая ось потока совпадает с осью камеры.

Тангенциальная составляющая скорости в ядре потока значительно превышает другие компоненты скорости [8], поэтому основным видом движения здесь следует считать вращательное.

Распределение безразмерной тангенциальной скорости по радиусу камеры может быть описано формулами [8]:

- для внутренней зоны течения ($0 \leq \eta \leq 1$):

$$\bar{w}_\varphi = \frac{2\eta}{1+\eta} \cdot \bar{w}_{\varphi m}; \quad (1)$$

- для внешней зоны течения ($1 \leq \eta \leq \eta_{\text{я}}^l$):

$$\bar{w}_\varphi = \frac{2}{1+\eta} \cdot \bar{w}_{\varphi m}, \quad (2)$$

где $\eta = \frac{r}{r_{\varphi m}}$; $\bar{w}_\varphi = \frac{w_\varphi}{w_{\varphi m}}$ – относительная скорость;

w_φ – тангенциальная скорость потока;

$w_{\varphi m}$ – максимальная тангенциальная скорость при радиусе равном $r_{\varphi m}$;

$\eta_{\text{я}}^l$ – безразмерный радиус осесимметричного ядра потока;

$$\bar{r}_{\varphi m} = \frac{\bar{d}_{\text{ВЫХ}}}{\left(5 \cdot \frac{0,95}{\bar{d}_{\text{ВЫХ}}} - 1\right) \cdot \bar{f}_{\text{ВХ}} + 0,7} \quad \text{– безразмерный радиус, характеризующий положение максимума тангенциальной скорости в рабочем объеме аппарата при нулевой длине выходного канала;}$$

$\bar{d}_{\text{ВЫХ}} = \frac{d_{\text{ВЫХ}}}{D_{\text{К}}}$; $\bar{f}_{\text{ВХ}} = \frac{4 \cdot a_{\text{ВХ}} h_{\text{ВХ}}}{\pi D_{\text{К}}^2}$; $\bar{w}_\varphi = \frac{w_\varphi}{v_{\text{ВХ}}}$;

$\bar{w}_{\varphi m} = \frac{w_{\varphi m}}{v_{\text{ВХ}}}$; $v_{\text{ВХ}}$ – скорость потока на входе в камеру;

$D_{\text{К}}$ – диаметр камеры.

Методика расчета температурного поля и толщины корочки шлама. Жидкий шлам по каналу 1 (рис. 1а) подается на вращающийся диск 2, получающиеся капли шлама попадают в закрученный поток высокотемпературного газа, до столкновения со стенкой 3 поверхность капли шлама в распылительной камере должна затвердеть, т. е. поверхность капли нагревается до температуры выше температуры фазового перехода воды, например, до 101 °С, и вся влага выходит из слоя. При этом поглощается теплота фазового перехода воды из жидкого состояния в пар в некотором тем-

пературном диапазоне. Небольшая часть холодного воздуха по каналу 7 идет на охлаждение вращающегося диска 2.

Прогрев капли жидкого шлама радиусом r_0 осуществляется в закрученном потоке высокотемпературного газа с температурой T_Γ и описывается сквозным уравнением теплопроводности с переменными граничными условиями третьего рода, учитывающими теплообмен конвекцией, и тепловым излучением по методике [9]. Решение осуществлялось методом конечных разностей по явной схеме аппроксимации производных.

Тестирование численного решения задачи путем оценки погрешности баланса теплоты в теле показало, что $k_y = 6$, $N = 40$ и $\Delta T = 2^\circ\text{C}$, $T_\Phi = 100^\circ\text{C}$.

Методика расчета относительной скорости и траектории движения капли шлама. На жидкую каплю шлама, движущуюся в закрученном высокотемпературном газовом потоке, действуют силы инерции $\vec{F}_и$, силы аэродинамического сопротивления \vec{F}_c и силы тяжести \vec{F}_g . Уравнения движения тела в проекциях на оси цилиндрической системы координат имеют вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dV_r}{dt} &= \frac{V_\Phi^2}{r} + \frac{3}{4} \cdot \frac{C \cdot \rho_\Gamma}{2 \cdot r_0 \cdot \rho_{\text{шлл}}} (W_r - V_r) \times \\ &\times \sqrt{(W_r - V_r)^2 + (W_\Phi - V_\Phi)^2 + (W_z - V_z)^2}; \\ \frac{dV_\Phi}{dt} &= \frac{V_r \cdot V_\Phi}{r} + \frac{3}{4} \cdot \frac{C \cdot \rho_\Gamma}{2 \cdot r_0 \cdot \rho_{\text{шлл}}} (W_\Phi - V_\Phi) \times \\ &\times \sqrt{(W_r - V_r)^2 + (W_\Phi - V_\Phi)^2 + (W_z - V_z)^2}; \\ \frac{dV_z}{dt} &= \frac{3}{4} \cdot \frac{C \cdot \rho_\Gamma}{2 \cdot r_0 \cdot \rho_{\text{шлл}}} (W_z - V_z) \times \\ &\times \sqrt{(W_r - V_r)^2 + (W_\Phi - V_\Phi)^2 + (W_z - V_z)^2} + g_0. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Для расчета траектории движения капли шлама система уравнений (1) дополняется кинематическими соотношениями:

$$V_r = \frac{dr}{dt}; \quad V_\Phi = \frac{1}{r} \cdot \frac{d\phi}{dt}; \quad V_z = \frac{dz}{dt}. \quad (4)$$

Здесь V_r, V_Φ, V_z – проекции вектора скорости капли шлама на оси r, ϕ, z – цилиндрических координат; W_r, W_Φ, W_z – проекции вектора скорости высокотемпературного газа на оси цилиндрических координат; C – коэффициент аэродинамического сопротивления капли шлама потоку газа; g_0 – ускорение свободного падения; $\rho_{\text{шлл}}$ – плотность капли шлама; ρ_Γ – плотность высокотемпературного газа.

Относительная скорость капли шлама и газового потока находится по выражению:

$$W_{\text{отн}} = \sqrt{(W_r - V_r)^2 + (W_\Phi - V_\Phi)^2 + (W_z - V_z)^2}. \quad (5)$$

Решение обыкновенных дифференциальных уравнений (3) осуществлялось численным методом Рунге – Кутты [10].

Расчет максимального диаметра капли шлама при дисковом распыле. Диаметр образующихся основных капель, исходя из условия равенств, действующих на каплю центробежной силы и силы поверхностного натяжения, выражается зависимостью [11]:

$$d = \frac{c}{\omega} \sqrt{\frac{\sigma}{R \cdot \rho_{\text{шлл}}}}, \quad (6)$$

где c – константа;

R – радиус диска;

σ – коэффициент поверхностного натяжения для жидкого шлама;

ω – угловая скорость вращения диска.

Справедливость соотношения (6) проверена различными исследованиями [11] в диапазоне изменения угловой скорости вращения диска от 30 до 1360 с^{-1} , радиусе диска от 10 до 110 мм, плотности жидкости от 300 до 1360 $\text{кг}/\text{м}^3$, коэффициенте поверхностного натяжения жидкости от 0,031 до 0,456 $\text{Н}/\text{м}$ и диаметре основных капель от 0,03 до 4 мм. В этом диапазоне изменения параметров значение c варьируется от 1,9 до 4,6. Установлено, что c мало зависит от профиля кромки диска.

Расчеты диаметра капель проводились по соотношению (6), изменялась угловая скорость вращения диска, радиус диска, константа c принималась максимальной, коэффициент по-

верхностного натяжения принимался равным $\sigma = 0,023$ [12].

При увеличении радиуса диска от 0,1 до 0,3 м максимальный диаметр капли уменьшается от $6,85 \cdot 10^{-3}$ до $9,9 \cdot 10^{-4}$ м. Угловая скорость вращения диска изменялась от 30 до 120 с^{-1} .

Алгоритм расчета теплообмена капли шлама в закрученном потоке газа. На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма расчета теплообмена капли жидкого шлама в закрученном высокотемпературном потоке газа.

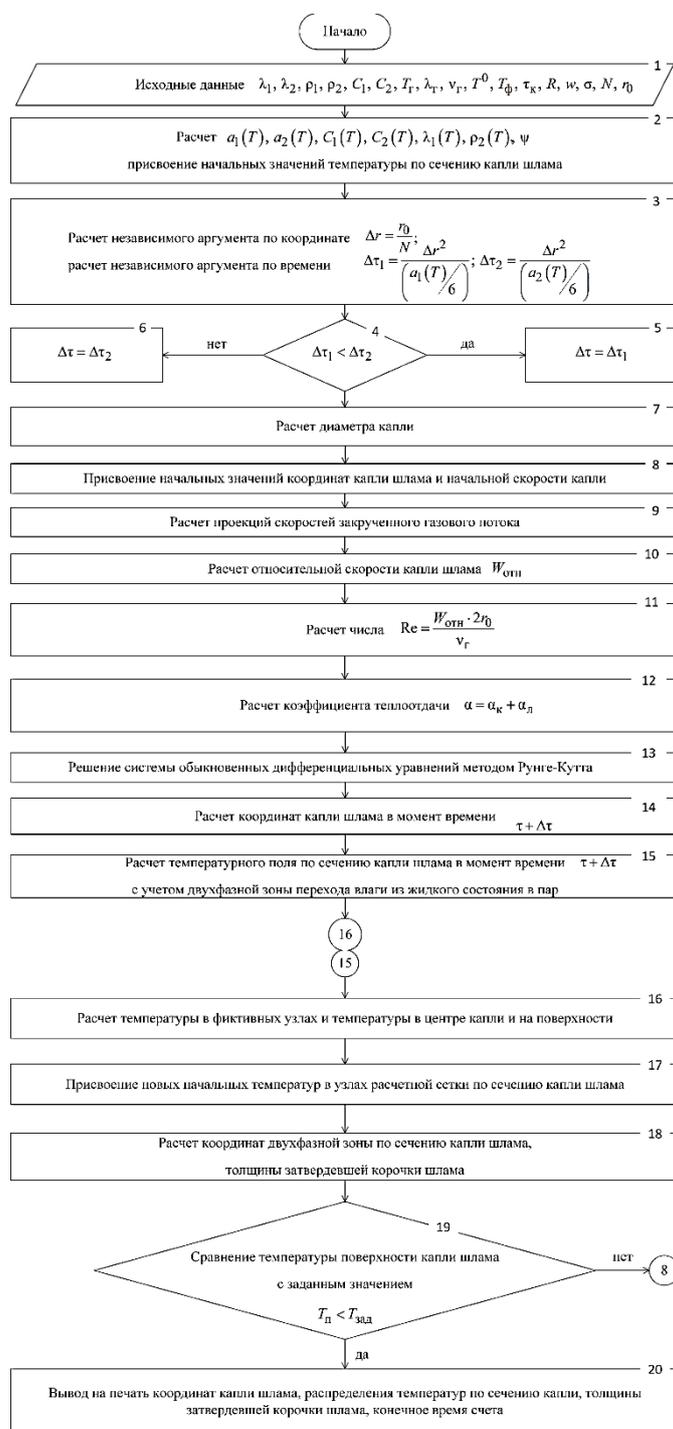


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

В блоке № 1 задаются исходные данные.

В блоке № 2 рассчитываются эффективные теплофизические характеристики жидкого шлама и происходит присвоение начальных значений температур по сечению капли.

В блоке № 3 рассчитывается независимый аргумент по координате и по времени.

В блоках № 4, 5, 6 осуществляется выбор наименьшего шага по времени.

В блоке № 7 по выбранному диаметру распылительного диска и угловой скорости вращения диска рассчитывается максимальный диаметр капли жидкого шлама.

В блоке № 8 присваиваются начальные значения координат капли и начальной скорости капли.

В блоке № 9 производится расчет проекций скоростей на оси цилиндрических координат закрученного высокотемпературного газового потока.

В блоке № 10 рассчитывается относительная скорость капли шлама.

В блоке № 11 производится расчет числа Рейнольдса.

В блоке № 12 рассчитывается коэффициент теплоотдачи за счет конвекции и теплового излучения.

В блоке № 13 осуществляется решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты.

В блоке № 14 рассчитываются координаты капли шлама в момент времени $\tau + \Delta\tau$, присвоение начальных значений координат

капли шлама в потоке закрученного высокотемпературного газа.

В блоке № 15 производится расчет температурного поля по сечению капли шлама в момент времени $\tau + \Delta\tau$ с учетом фазового перехода влаги из жидкого агрегатного состояния в пар.

В блоке № 16 осуществляется расчет температур в фиктивных узлах, в центре и на поверхности капли шлама.

В блоке № 17 осуществляется присвоение начальных температур в узлах расчетной сетки по сечению капли шлама.

В блоке № 18 осуществляется расчет координат двухфазной зоны по сечению капли шлама и толщины сухой корочки шлама.

В блоке № 19 производится сравнение температур на поверхности капли шлама с заданными значениями, например, 101 °С [5]. И если температура поверхности достигла заданного значения, в блоке № 20 осуществляется вывод на печать координат капли шлама, распределения значений температур по сечению капли шлама, толщины сухой корочки шлама, конечное время счета.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлена взаимосвязь полярных координат капли шлама по радиусу траектории движения в момент высыхания поверхностного слоя капли шлама от диаметра капли.

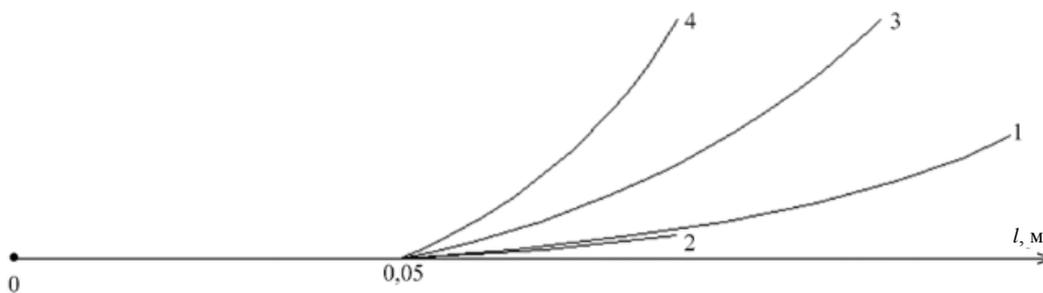


Рис. 3. Проекция траекторий движения частиц шлама на горизонтальную плоскость:
1 – $\omega = 150$, $d = d_{\text{макс}}$; 2 – $\omega = 150$, $d = d_{\text{макс}} / 2$; 3 – $\omega = 30$, $d = d_{\text{макс}}$; 4 – $\omega = 30$, $d = d_{\text{макс}} / 2$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Из рис. 3 видно, что с увеличением диаметра каплей координата по радиусу увеличивается. При этом с увеличением угловой ско-

рости вращения диаметр капли уменьшается и увеличивается скорость отрыва капли от диска. При угловой скорости вращения диска 150 с^{-1}

траектория 1 капли шлама диаметром $d_{\text{макс}}$ больше траектории 2 капли диаметром $d_{\text{макс}}/2$. При угловой скорости вращения в 5 раз меньшей траектория 3 капли диаметром $d_{\text{макс}}$ больше траектории 4 капли диаметром $d_{\text{макс}}/2$ в момент высыхания поверхности капли шлама.

На рис. 4а представлена взаимосвязь диаметра капли шлама и угловой скорости вращения диска для разных диаметров. На рис. 4б

представлена зависимость скорости отрыва капли шлама от угловой скорости вращения диска разного диаметра. Из рис. 4 видно, что с увеличением угловой скорости вращения диска уменьшается диаметр капли (рис. 4а), а с увеличением угловой скорости вращения диска увеличивается скорость отрыва капли от диска (рис. 4б). С увеличением диаметра диска диаметр капель уменьшается, а скорость отрыва капель возрастает (рис. 4).

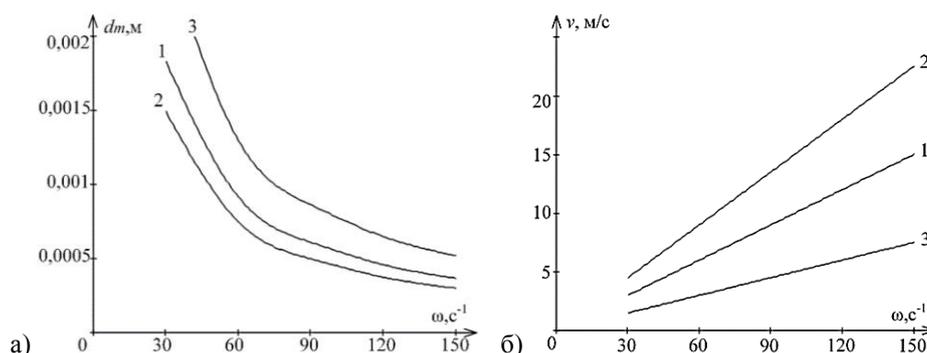


Рис. 4. Взаимосвязь угловой скорости вращения диска, скорости отрыва капель и максимального диаметра капель шлама: 1 – $R_D = 0,1$; 2 – $R_D = 0,15$; 3 – $R_D = 0,05$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 5 представлены поля температур по сечению капли в момент полного высыхания поверхности капли. Из рисунка видно, что с увеличением температуры греющего газа резко увеличивается градиент темпе-

ратуры в поверхностном слое и продолжительность сушки уменьшается в 1,76 раза с $1,70 \cdot 10^{-4}$ с при $T_r = 1\,000$ °С до $9,68 \cdot 10^{-5}$ с при $T_r = 1\,200$ °С.

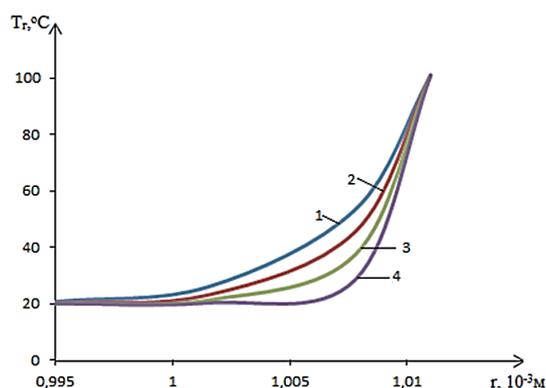


Рис. 5. Температурные поля в капле в момент высыхания поверхностного слоя: 1 – $T_r = 900$ °С; 2 – $T_r = 1\,000$ °С; 3 – $T_r = 1\,100$ °С; 4 – $T_r = 1\,200$ °С

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 6 представлена взаимосвязь траектории движения капли, радиуса и угловой скорости вращения диска в момент высыхания

поверхностного слоя. Из рис. 6 видно, что с увеличением радиуса и угловой скорости вращения распыливающего диска конечные

координаты траектории капли увеличиваются. При угловой скорости вращения диска $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$ и увеличении радиуса диска с 0,05 до 0,15 м конечные координаты траектории увеличиваются в 2,98 раза. С увеличением

угловой скорости вращения диска диаметр капли уменьшается, а скорость отрыва капли от диска увеличивается, поэтому конечные координаты капли по радиусу примерно одинаковы.

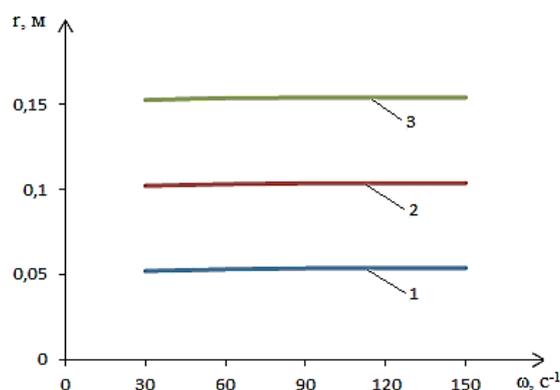


Рис. 6. Взаимосвязь траектории движения капли, радиуса и угловой скорости вращения распылительного диска при температуре греющего газа $1\ 000\ ^\circ\text{C}$:

1 – радиус диска 0,05 м; 2 – радиус диска 0,1 м; 3 – радиус диска 0,15 м

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 7 представлено влияние температуры греющей среды на конечные координаты траектории капли в момент высыхания поверхностного слоя. Из рис. 7 видно, что при увеличении температуры греющей

среды от $1\ 000$ до $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ конечные координаты капли уменьшаются на 1 % при угловой скорости вращения диска равной $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$ и радиусе диска $R_D = 0,15 \text{ м}$.

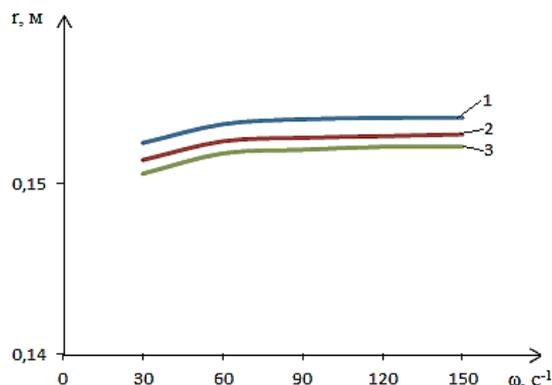


Рис. 7. Влияние температуры греющей среды на траекторию капли:

1 – $T_r = 1\ 000\ ^\circ\text{C}$; 2 – $T_r = 1\ 100\ ^\circ\text{C}$; 3 – $T_r = 1\ 200\ ^\circ\text{C}$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Анализ полученных данных показывает, что на габаритные размеры камеры распыления оказывают влияние размер распыливающего диска, угловая скорость вращения диска, а также скорость входа газового потока в камеру распыления. Чем больше угловая скорость диска, тем меньше получается макси-

мальный диаметр капли распыла, а скорость отрыва капли от диска увеличивается, конечные координаты траектории капли по радиусу мало изменяются. При этом в 2–3 раза уменьшается время, необходимое для испарения влаги из поверхностного слоя капли шлама. Увеличение размера распыливающего диска

приводит к увеличению начальной скорости капли и уменьшению максимального диаметра капли. Увеличение размера диска с радиуса, равного 0,05 м, до радиуса, равного 0,15 м, (т. е. в три раза) уменьшает максимальный диаметр капель шлама в 2 раза. Скорость отрыва капель увеличивается в 3 раза, что увеличивает соответственно коэффициент теплоотдачи. Таким образом, математическая модель позволяет прогнозировать характерные размеры камеры распыления при проектировании устройства, а именно диаметр камеры и необходимую высоту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования траектории движения жидкой капли шлама, содержащего воду, масло и железную окалину, в закрученном потоке высокотемпературного газа создана математическая модель теплообмена жидкой

капли шлама с учетом фазового перехода воды из жидкого состояния в паровое. Получены траектории капель шлама в закрученном высокотемпературном потоке газа в цилиндрической системе координат, взаимосвязь координат капли шлама в момент высыхания верхнего слоя шлама от диаметра капли, времени, необходимого для высыхания верхнего слоя в зависимости от диаметра капли. Полученные координаты позволяют прогнозировать характерные размеры камеры при проектировании установки распыления и сушки шлама. Предложен алгоритм расчета теплообмена капли шлама в закрученном высокотемпературном потоке газа с учетом двухфазной зоны перехода влаги из жидкого состояния в пар. В дальнейшем предполагается разработка системы управления процессом высокотемпературной сушки капель шлама на промышленном объекте.

Список источников

1. Пантелят Г. С., Никулин С. Е., Царенко А. Н. и др. Опыт эксплуатации систем оборотного водоснабжения непрерывных станов 2000 горячей прокатки // ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 1989. № 12. С. 67–69.
2. Бабошин В. М., Кривцевцов Е. А., Абзалов В. М. и др. Теплофизические свойства топлив и смазочных материалов черной металлургии. М.: Металлургия, 1982. 150 с.
3. Ульянов В. П., Жилина Н. И., Ковтун В. Ф. и др. Безотходная термическая переработка водомаслоокалиносодержащих отходов // Сталь. 1989. № 1. С. 88–92.
4. Галкин Ю. А., Пантелят Г. С., Галый Л. Г. и др. Физико-химические свойства осадков окалинмаслосодержащих сточных вод // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1993. № 2. С. 73–75.
5. Синецын Н. Н., Маклаков А. В., Дмитриева С. Р. Исследование температурного поля плоского слоя замасленной окалины при испарении влаги // Проблемы и перспективы развития науки и образования в XXI веке: материалы Международ. науч.-практич. конф., 25 апреля 2022 г., г. Нефтекамск. Нефтекамск: НИЦ «Мир Науки», 2022. С. 90–94.
6. Харьков В. В., Николаев А. Н. Численное моделирование тепло- и массообмена в процессе концентрирования термолабильных растворов в закрученном потоке // Ползуновский вестник. 2017. № 1. С. 30–34.

References

1. Pantelyat G. S., Nikulin S. E., Tsarenko A. N. et al. Opyt ekspluatatsii sistem oborotnogo vodosnabzheniia nepreryvnykh stanov 2000 goriachei prokatki. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information*. 1989;(12):67–69. (In Russian).
2. Baboshin V. M., Krivtsevtsov E. A., Abzalov V. M. et al. Teplofizicheskie svoistva topliv i smazochnykh materialov chernoii metallurgii. Moscow: Metallurgii; 1982. 150 p. (In Russian).
3. Ulyanov V. P., Zhilina N. I., Kovtun V. F. et al. Bezotkhodnaia termicheskaia pererabotka vodomaskalinosoderzhashchikh otkhodov. *Stal*. 1989;(1):88–92. (In Russian).
4. Galkin Yu. A., Pantelyat G. S., Galyi L. G. et al. Fiziko-khimicheskie svoistva osadkov okalinmaslodosoderzhashchikh stochnykh vod. *Metallurgical and Mining Industry*. 1993;(2):73–75. (In Russian).
5. Sinitsyn N. N., Maklakov A. V., Dmitrieva S. R. Issledovanie temperaturnogo polia ploskogo sloia zamaslennoi okaliny pri isparenii vlagi. In: *Proceedings of the International Research-to-Practice Conference "Problemy i perspektivy razvitiia nauki i obrazovaniia v XXI veke"*, April 25, 2022, Neftekamsk. Neftekamsk: NITs "Mir Nauki"; 2022. p. 90–94. (In Russian).
6. Kharkov V. V., Nikolaev A. N. Chislennoe modelirovanie teplo- i massoobmena v protsesse kontsentrirvaniia termolabilnykh rastvorov v zakruchennom potoke. *Polzunovskiy vestnik*. 2017;(1):30–34. (In Russian).
7. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Evaporation of water droplets moving through high-temperature gases.

7. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Испарение капель воды при движении через высокотемпературные газы // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91, № 1. С. 104–111.
8. Сабуров Э. Н., Карпов С. В. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве. М.: Экология, 1993. 365 с.
9. Синицын Н. Н., Запатрина Н. В., Куценко В. Н. Математическое моделирование и управление термомеханическим разрушением одиночных кусков угля // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1. С. 59–78.
10. Калиткин Н. Н. Численные методы / под ред. А. А. Самарского. М.: Наука, 1978. 512 с.
11. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984. 256 с.
12. Никольский Б. П., Григорьев О. Н., Позин М. Е. Справочник химика. Т. 1. Химия. М.; Л., 1966. 1071 с.
8. Saburov E. N., Karpov S. V. Tsiklonnye ustroistva v derevoobrabatyvaiushchem i tselliulozno-bumazhnom proizvodstve. Moscow: Ekologiya; 1993. 365 p. (In Russian).
9. Sinitsyn N. N., Zapatrina N. V., Kutsenko V. N. Mathematical modeling and controlling thermomechanical destruction of single pieces of coal. *Cherepovets State University Bulletin*. 2023;(1):59–78. (In Russian).
10. Kalitkin N. N. Chislennyye metody. Samarsky A. A., editor. Moscow: Nauka; 1978. 512 p. (In Russian).
11. Pazhi D. G., Galustov V. S. Osnovy tekhniki raspylivaniia zhidkostei. Moscow: Khimiia; 1984. 256 p. (In Russian).
12. Nikolsky B. P., Grigoryev O. N., Pozin M. E. Spravochnik khimika. Vol. 1. Khimiia. Moscow; Leningrad; 1966. 1071 p. (In Russian).

Информация об авторах

Н. Н. Синицын – доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования.

Н. В. Запатрина – кандидат технических наук, доцент.

И. А. Сарычева – кандидат технических наук.

Ю. В. Грибкова – кандидат технических наук.

Е. В. Голицына – кандидат технических наук, доцент.

Ю. В. Донцова – аспирант.

Information about the authors

N. N. Sinitsyn – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Honored Worker of Higher Education.

N. V. Zapatrina – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

I. A. Sarycheva – Candidate of Sciences (Engineering).

Yu. V. Gribkova – Candidate of Sciences (Engineering).

E. V. Golitsyna – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

Yu. V. Dontsova – Postgraduate.

Научная статья
УДК 004.896
DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-76-81

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ НЕЧЕТКОЙ НЕЙРОСЕТИ

Екатерина Александровна Энгель^{1✉}, Никита Евгеньевич Энгель²

^{1, 2} Хакасский государственный университет имени Н. Ф. Катанова, Абакан, Россия

¹ ekaterina.en@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3023-0195>

² nikita.en@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7216-6398>

Аннотация. В условиях противоречивости прогнозов погоды в сравнении с классическими методами нейросети идентифицируют нелинейную с неопределенностями динамику температуры, однако для повышения их точности требуется интеллектуальная адаптация для конкретного местоположения, которая реализуется интеллектуальной системой прогнозирования с использованием модифицированной нечеткой нейросети с механизмом внимания, адаптированным для условий противоречивости прогнозов погоды разных метеорологических сайтов. Представлены разработка и экспериментальное моделирование с использованием модифицированного авторского программного обеспечения интеллектуальной системы прогнозирования температуры на основе модифицированной нечеткой нейросети с адаптированным механизмом внимания, выделяющим на основе архивных данных существенные аспекты прогнозирования, включая нелинейную динамику температуры. Результаты разработанной системы демонстрируют ее робастность и снижение среднеквадратичной ошибки ее прогноза в среднем в три раза в сравнении с рекуррентными нейросетями в условиях неопределенности и противоречивости прогноза погоды.

Ключевые слова: прогнозирование температуры, нечеткая нейросеть, механизм внимания

Благодарности: исследование выполнено в рамках мероприятия «Разработка интеллектуальных систем прогнозирования и максимизации выработки электроэнергии солнечной электростанции на основе оригинальной модифицированной нечеткой нейросети, их реализация как программ для ЭВМ и внедрение на электростанции возобновляемых источников энергии» программы деятельности НОЦ мирового уровня «Енисейская Сибирь».

Финансирование: исследование выполнено за счет средств гранта Министерства образования и науки Республики Хакасия (Соглашение от 13.12.22 № 91) научно-исследовательский проект «Разработка интеллектуальной системы непрямого прогнозирования выработки электроэнергии солнечной электростанции на основе модифицированной нечеткой нейросети».

Для цитирования: Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Интеллектуальная система прогнозирования температуры на основе модифицированной нечеткой нейросети // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 76–81. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-76-81.

Original article

AN INTELLIGENT SYSTEM FOR TEMPERATURE FORECASTING BASED ON A MODIFIED FUZZY NEURAL NETWORK

Ekaterina A. Engel^{1✉}, Nikita E. Engel²

^{1, 2} Katanov Khakas State University, Abakan, Russian

¹ ekaterina.en@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3023-0195>

² nikita.en@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7216-6398>

Abstract. In the setting of ambiguous weather forecasting, neural networks outperform traditional approaches in identifying nonlinear temperature dynamics with uncertainty. However, in order to improve neural network accuracy, an intelligent adaptation for a specific location that is implemented through an intelligent forecasting system with a modified fuzzy neural network with an attention mechanism adapted for conditions

of weather forecasting ambiguity registered on various meteorological websites is required. The study describes the design and test simulation of an intelligent system for a temperature forecast based on a modified fuzzy neural network with an adaptive attention mechanism, highlighting significant forecasting aspects such as nonlinear temperature dynamics based on repository data, using modified authors' software. The findings of the system developed demonstrate its robustness and a decrease in the root mean square error of its forecast by three on average compared to the recurrent neural networks in the setting of undefined and ambiguous weather forecast.

Keywords: temperature forecast, fuzzy neural network, attention mechanism

Acknowledgments: the study is carried out in the framework of the event "Development of Intelligent Systems for Forecasting and Maximizing a Solar Power Generation Based on an Original Modified Fuzzy Neural Network, Their Implementation as Computer Software and Introduction at the Reusable Electric Power Plant" included in the program of the word-class Yenisey Siberia Scientific and Educational Center.

Funding: the study is supported by the Ministry of Education and Science of Khakassia's grant (agreement of December 13, 2022 No. 91) – research project "Development of an Intelligent System for Indirect Forecasting of Solar Power Generation Based on a Modified Fuzzy Neural Network".

For citation: Engel E. A., Engel N. E. An intelligent system for temperature forecasting based on a modified fuzzy neural network. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):76–81. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-76-81.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с разделом «Информационные технологии, искусственный интеллект и новые материалы», утвержденным Указом Президента РФ «Стратегии научно-технологического развития России до 2035», разработка интеллектуальных систем актуальна и для настоящего исследования [1].

В работе [2] выявлены линейная зависимость вырабатываемой мощности солнечных панелей с инсоляцией и нелинейная – с температурой. Анализ интеллектуальных систем прогнозирования вырабатываемой мощности солнечных панелей [3–6] показал, что точность прогноза не прямой системы прогнозирования выработки солнечных панелей намного выше прямой системы прогнозирования [3]. Таким образом, целесообразна и актуальна разработка интеллектуальной системы непрямого прогнозирования выработки солнечных панелей, включающей интеллектуальные подсистемы прогнозирования инсоляции и температуры на основе модифицированной нечеткой нейросети. Нелинейную с неопределенностями динамику температуры идентифицировать классическими методами с требуемой точностью нельзя, в то время как рекуррентные нейросети, настроенные на архивных данных, включая прогноз погоды, требуемую точность обеспечивают [7]. В условиях противоречивости прогнозов погоды разных метеорологических сайтов в работе [7] для существующих нейросетевых моделей прогнозирования

температуры выявлена проблема интеллектуальной адаптации для конкретного местоположения. Указанная проблема решается в данном исследовании разработкой интеллектуальной системы прогнозирования температуры с использованием модифицированной нечеткой нейросети с механизмом внимания (МННВ), адаптированным для условий противоречивости прогнозов погоды разных метеорологических сайтов, настроенной модифицированным оптимизатором квантовых многомерных частиц роя (МОКМЧР), который подробно описан в работе [8].

Результаты экспериментального моделирования созданной и верифицированной с использованием модифицированного авторского программного обеспечения (ПО) [9] интеллектуальной системы прогнозирования температуры на основе МННВ демонстрируют ее робастность и снижение среднеквадратичной ошибки ее прогноза в среднем в три раза в сравнении с рекуррентными нейросетями в условиях неопределенности и противоречивости прогноза погоды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В условиях противоречивости прогноза погоды метеорологических сайтов были выбраны лидеры по точности прогноза погоды [10]: Gismeteo [11] и Яндекс.Погода [12].

Создана и верифицирована интеллектуальная система прогнозирования температуры

с использованием МННВ, настроенной на основе данных:

$$X_h^t = (P_h^t, W_h^t, d_h^t, T_{y_h}^t, T_{g_h}^t, T_h^{t-2}), \quad (1)$$

где P_h^t – атмосферное давление;

W_h^t и d_h^t – скорость и направление ветра соответственно;

T_h^t – температура воздуха;

$T_{y_h}^t$ и $T_{g_h}^t$ – значения прогнозируемой температуры воздуха, предоставленные Яндекс. Погодой и Gismeteo соответственно;

T_h^t – фактическая температура воздуха;

$h = 1...4, t \in \{1, \dots, 365 \times 3\}$.

Интеллектуальная система прогнозирования температуры в форме МННВ создается за 4 этапа:

1-й этап. Сначала все примеры вида (1) были классифицированы на две группы согласно состоянию правильности прогноза температуры: A_1 – солнечный час, ($o_h^t = 1$), A_2 – облачный час ($o_h^t = -1$). Векторы X_h^t (3) и o_h^t являются входным и целевым соответственно для рекуррентной нейросети с механизмом внимания Y^0 , генерирующей выходной сигнал $n = Y(d_{h_1}, d_{h_2}, X_h^t)$, где d_{h_1} и d_{h_2} – количество рекуррентных нейронов в скрытом слое (первый слой МННВ) и в слое механизма внимания (второй слой МННВ).

2-й этап. Неинтерпретированный выходной сигнал рекуррентной нейросети с механизмом внимания $n = Y(d_{h_1}, d_{h_2}, X_h^t)$ формирует нечеткие множества A_j (A_1 – облачный час, A_2 – солнечный час, $j = 1...2$) и соответствующие функции принадлежности μ_j следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{If } n > 0 \text{ then } \mu_1(X_h^t) &= n, \mu_2(X_h^t) = \\ &= 1 - \mu_1(X_h^t) \text{ else } \mu_2(X_h^t) = \text{abs}(n), \mu_1(X_h^t) = \\ &= 1 - \mu_2(X_h^t). \end{aligned}$$

3-й этап. Третий нейросетевой слой МННВ включает рекуррентные нейросети Y_i^j , имеющие целевой сигнал T_h^t и генерирующие

выходные сигналы $y_i^j = Y(d_{h_3}^j, X_h^t)$, $j = \overline{1...2}$.

Параметры архитектуры МННВ (количество скрытых нейронов – $d_{h_i} \in [1, 7]$, их веса, количество временных задержек – $d_{q_i} \in [1, 3]$) кодируются частицей X . Оптимальная архитектура МННВ – $gbest$, включающая рекуррентные нейросети Y^0 и Y_i^j , создается методом МОКМЧР [7] на наборе данных вида (1). Фитнесс-функция МОКМЧР вычисляется как среднеквадратичная ошибка (RMSE – Root Mean Square Error) согласно выражению:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1, h=1...4}^N (T_h^i - u_h^i)^2}, \quad (2)$$

где N – число оцениваемых примеров;

u_h^i – прогнозируемое значение температуры воздуха;

T_h^i – фактическое значение температуры воздуха.

4-й этап. Составляются нейро-нечеткие продукционные правила МННВ:

$$P_j : \text{ЕСЛИ } X_h^t \text{ есть } A_j \text{ ТО } u_h^t \text{ есть } Fes(y_i^j). \quad (3)$$

Слой механизма внимания является состоящей из d_{h_1} нейронов однослойной нейросетью, матрица весов внимания которой – вектор L – вычисляется следующим образом: вектор скрытых состояний $H_e^0 (e = 1...d_{h_1})$, дополненный последним элементом $Y(d_{h_1}^j, X_h^{t-1})$ (где $Y(d_{h_1}^j, X_h^{t-1})$ – предыдущее значение выходного нейрона рекуррентной нейросети третьего нейросетевого слоя МННВ), умножается на матрицу синаптических коэффициентов однослойной нейросети, реализующей функцию внимания. К полученному вектору L применяется активационная функция Softmax, получается V – вектор весов внимания. Вектор-контекст s вычисляется как произведение векторов H и V . Далее рекуррентные нейросети Y_i^j функционируют как обычно, с учетом выходного значения МННВ, дополненного последним элементом u_h^{t-1} (где u_h^{t-1} – предыдущее значение выхода МННВ), и вектора-контекста s .

Интеллектуальная система прогнозирования температуры в форме МННВ функционирует следующим образом: агрегация antecedента правил (5) на основе вектора X_h^t (1) по функции $ind(\mu_j) = \{j | \forall k \neq j, \mu_j \geq \mu_k\}$ активирует z -ю субкультуру рекуррентных нейросетей; на основе нечетко-возможностной свертки выходных сигналов Y_h^z формируется

выходной сигнал МННВ u_h^t – прогнозируемое на основе МННВ значение температуры воздуха.

Интеллектуальная система прогнозирования температуры в форме МННВ кратко описывается схемой на рисунке, отражающей структуру и функционирование МННВ.

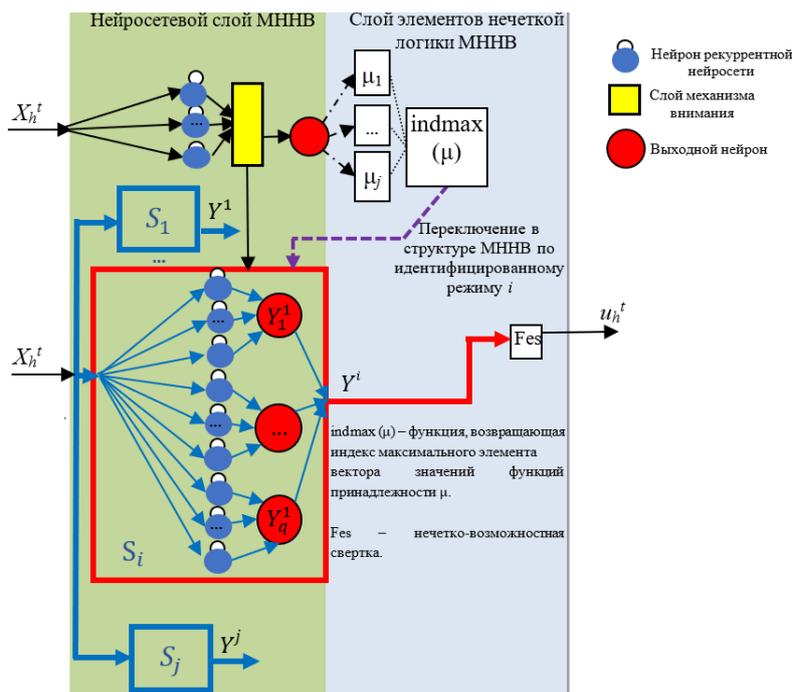


Рисунок. Интеллектуальная модель максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Интеллектуальная система прогнозирования температуры в форме МННВ реализована и экспериментально апробирована моделированием. На основе модифицированного авторского ПО [9] создана МННВ и обучена рекуррентная нейросеть (количество скрытых нейронов и задержек равно 5 и 2 соответственно) на основе данных (1). МОКМЧР на обучающей выборке (1) ($t \in [1, 365 \times 2]$) автоматически синтезировал *gbest* – оптимальную архитектуру МННВ, включающую:

- рекуррентную нейросеть с механизмом внимания Y^0 с двумя рекуррентными нейронами в скрытом слое ($h_1^0 = 2$, временная задержка равна 2) и с тремя нейронами в слое механизма внимания ($h_2^0 = 3$);

- две рекуррентные нейросети Y_i^1 первой субкультуры, соответствующей нечеткому состоянию A_2 , с четырьмя и пятью рекуррентными нейронами в скрытом слое соответственно ($h_1^1 = 4$, $h_2^1 = 5$, временная задержка равна 2);

- две рекуррентные нейросети Y_i^2 первой субкультуры, соответствующей нечеткому состоянию A_1 , с двумя и тремя рекуррентными нейронами в скрытом слое соответственно ($h_1^2 = 2$, $h_2^2 = 3$, временная задержка равна 1).

Для последнего года трехлетнего архива (не используемого для синтеза МННВ и рекуррентной нейросети) эффективность системы прогнозирования температуры на основе МННВ в сравнении с рекуррентной нейросетью оценивалась среднеквадратич-

ной ошибкой (2), средней абсолютной ошибкой (MAE – Mean Absolute Error) и ошибкой смещения (BIAS).

MAE вычисляли следующим образом:

$$MAE = \frac{1}{365} \sum_{i=731, h=1..4}^{N1095} |T_h^i - u_h^i|. \quad (4)$$

BIAS вычисляли как:

$$BIAS = \frac{1}{365} \sum_{i=731, h=1..4}^{1095} (T_h^i - u_h^i). \quad (5)$$

Сравнительный анализ эффективности (таблица) выявил, что МННВ в сравнении с рекуррентной нейросетью обеспечивает более точный прогноз температуры. Таблица демонстрирует робастность и снижение среднеквадратичной ошибки системы прогнозирования температуры на основе МННВ в среднем в три раза в сравнении с рекуррентными нейросетями в условиях неопределенности и противоречивости прогноза погоды.

Таблица

Результаты МННВ и рекуррентной нейросети при прогнозировании температуры

Ошибка (°C)	МННВ	Рекуррентная нейросеть
MAE	0,03	0,12
RMSE	0,04	0,14
BIAS	0,01	0,16

Примечание: МННВ – модифицированная нечеткая нейросеть с механизмом внимания; MAE – средняя абсолютная ошибка; RMSE – среднеквадратичная ошибка; BIAS – смещение. Составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Таким образом, эффективность МННВ (как нечеткой системы, формируемой рекуррентными нейросетями с механизмом внимания) при прогнозировании температуры выше, чем эффективность отдельной рекуррентной нейросети. МННВ эффективно транслирует функциональные аспекты прогнозирования температуры средствами рекуррентных нейронов и механизма внимания, обеспечивая эффективное формирование на основе данных (1) и трансляцию скрытого представления информации (1), включая нелинейную динамику температуры. Механизм внимания обеспечивает выделение существенных аспектов динамики температуры и передачу этой информации как сигнала на слой скрытых рекуррентных нейронов j -й субкультуры нейросетей Y_i^j .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании разработана, верифицирована и экспериментально апробирована моделирование при помощи модифицированного авторского ПО система прогнозирования температуры на основе МННВ. МННВ обеспечивает эффективное выделение существенных аспектов прогнозирования температуры средствами рекуррентных нейронов и механизма внимания, обеспечивая на основе архивных данных эффективное формирование и трансляцию скрытого представления информации, включая нелинейную динамику температуры. Результаты экспериментального моделирования системы прогнозирования температуры на основе МННВ демонстрируют ее робастность и снижение среднеквадратичной ошибки ее прогноза в среднем в три раза в сравнении с рекуррентными нейросетями в условиях неопределенности и противоречивости прогноза погоды.

Список источников

1. Большие вызовы и приоритеты научно-технологического развития. URL: <https://xn--mlagf.xn--plai/challenges-priorities/> (дата обращения: 20.07.2023).
2. Liu L. Forecasting power output of photovoltaic system using A BP network. *Energy Procedia*. 2017;142:780–786.
3. Durrani S. P., Balluff S., Wurzer R. et al. Photovoltaic yield prediction using an irradiance forecast model based on multiple neural networks. *J Mod Power Syst Clean Energy*. 2018;6:255–267.

References

1. Bolshie vyzovy i priorityty nauchno-tekhnologicheskogo razvitiia. URL: <https://xn--mlagf.xn--plai/challenges-priorities/> (accessed: 20.07.2023). (In Russian).
2. Liu L. Forecasting power output of photovoltaic system using A BP network. *Energy Procedia*. 2017;142:780–786.
3. Durrani S. P., Balluff S., Wurzer R. et al. Photovoltaic yield prediction using an irradiance forecast model based on multiple neural networks. *J Mod Power Syst Clean Energy*. 2018;6:255–267.

4. Engel E., Engel N. A Review on machine learning applications for solar plants. *Sensors*. 2022;22(23):9060.
5. Wu Y.-K., Huang C.-L., Phan Q.-T. et al. Completed review of various solar power forecasting techniques considering different viewpoints. *Energies*. 2022; 15(9):3320.
6. Gaviria J. F., Narváez G., Guillen C. et al. Machine learning in photovoltaic systems: A review. *Renewable Energy*. 2022;196:298–318.
7. Jaseena K. U., Kovoor B. C. Deterministic weather forecasting models based on intelligent predictors: A survey. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022;34(6 pt B):3393–3412.
8. Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Модуль модифицированной нечеткой нейронной сети : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 202168035 Рос. Федерация. № 22021681065 ; заявл. 09.12.2021 ; опублик. 17.12.2021 ; заявитель ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова». URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_47480682_23010232.PDF (дата обращения: 20.07.2023).
9. Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Интеллектуальная модель максимизации генерируемой мощности реконструируемой солнечной электростанции // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 52–58.
10. Топ 14 сайтов прогноза погоды. URL: <https://stroisovet.com/kakoj-sajt-prognoza-pogody-samyj-tochnyj-pogorodam-rossii-i-mira/> (дата обращения: 20.07.2023).
11. Gismeteo. URL: <https://www.gismeteo.ru/> (дата обращения: 20.07.2023).
12. Яндекс.Погода. URL: <https://yandex.ru/pogoda> (дата обращения: 20.07.2023).
4. Engel E., Engel N. A Review on machine learning applications for solar plants. *Sensors*. 2022;22(23):9060.
5. Wu Y.-K., Huang C.-L., Phan Q.-T. et al. Completed review of various solar power forecasting techniques considering different viewpoints. *Energies*. 2022; 15(9):3320.
6. Gaviria J. F., Narváez G., Guillen C. et al. Machine learning in photovoltaic systems: A review. *Renewable Energy*. 2022;196:298–318.
7. Jaseena K. U., Kovoor B. C. Deterministic weather forecasting models based on intelligent predictors: A survey. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022;34(6 pt B):3393–3412.
8. Engel E. A., Engel N. E. Modified fuzzy neural network module. RU Certificate of registration for a computer program 202168035. No. 22021681065, filed December 9, 2021, issued December 17, 2021, applicant Katanov Khakass State University. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_47480682_23010232.PDF (accessed: 20.07.2023). (In Russian).
9. Engel E. A., Engel N. E. Intelligent model for maximizing the generated power of a reconfigurable solar power plant. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(1):52–58. (In Russian).
10. Top 14 saitov prognoza pogody. URL: <https://stroisovet.com/kakoj-sajt-prognoza-pogody-samyj-tochnyj-pogorodam-rossii-i-mira/> (accessed: 20.07.2023). (In Russian).
11. Gismeteo. URL: <https://www.gismeteo.ru/> (accessed: 20.07.2023). (In Russian).
12. Iandeks.Pogoda. URL: <https://yandex.ru/pogoda> (accessed: 20.07.2023). (In Russian).

Информация об авторах

Е. А. Энгель – кандидат технических наук, доцент.
Н. Е. Энгель – бакалавр.

Information about the authors

E. A. Engel – Candidate of Sciences (Engineering),
 Docent.
N. E. Engel – Bachelor’s Degree Student.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья
УДК 519.857
DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-82-98

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОТОМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ТУПИКОВЫМИ УПРАВЛЕНИЯМИ

Виктор Павлович Корнеенко

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук,
Москва, Россия
vkorn@ipu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3643-1609>*

Аннотация. Статья посвящена решению задачи многокритериального планирования запуска расчетов большого числа одновременно решаемых трудоемких вычислительных задач в условиях реализации режима разделения времени их решения в мультипроцессорных вычислительных системах программно-аппаратных средств центра управления полетом космических аппаратов. Планы формирования секторами управления программно-командной информации выполнены на динамической рекуррентной модели с тупиковыми управлениями. Определены критерии выбора эффективного варианта суточного плана работы секторов управления, представленного в виде временных интервалов допуска к ресурсам вычислительной системы. Применение метода тупиковых управлений в рамках динамической модели обусловлено его вычислительной эффективностью по сравнению с традиционными алгоритмами дискретной оптимизации. Приводится пример расчета алгоритмом тупиковых управлений рабочей программы, которая закладывается на борт космического аппарата во время сеанса связи.

Ключевые слова: многокритериальный выбор, план работы центра управления полетом, динамическая модель, тупиковые управления, режим разделения времени

Для цитирования: Корнеенко В. П. Многокритериальное планирование работы центра управления полетом космических аппаратов на динамической модели с тупиковыми управлениями // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 82–98. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-82-98.

Original article

MULTI-CRITERIAL SCHEDULING OF A SPACECRAFT CONTROL CENTER'S OPERATION ON A DYNAMIC MODEL WITH DEAD-END CONTROLS

Viktor P. Korneenko

*V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
vkorn@ipu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3643-1609>*

Abstract. The article is devoted to the solution of a problem of multi-criterial scheduling for execution of calculations of a large number of time-consuming computational tasks being solved simultaneously when implementing the time-sharing mode for their solutions in software and hardware's multi-processor computing systems by the spacecraft control center. A dynamic recurrent model with dead-end controls is used to implement the schedule of organizing software command information with control sectors. The criteria for selecting an efficient option of a daily schedule for the control sectors' operation are determined, with the schedule being presented as time intervals of access to the computing system's resources. Compared to the traditional algorithms of discrete optimization, the method of dead-ends control is more efficient in calculation in the framework of a dynamic model. An example of calculations conducted by the dead-end controls algorithm for the operational program, which is used on board of the spacecraft during a communication session, is given.

Keywords: multi-criteria selection, spacecraft control center's operation plan, dynamic model, dead-end controls, time-sharing mode

For citation: Korneenko V. P. Multi-criterial scheduling of a spacecraft control center's operation on a dynamic model with dead-end controls. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):82–98. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-82-98.

ВВЕДЕНИЕ

Сектора управления центра управления полетами (ЦУП) космических аппаратов (КА) решают полный комплекс задач по сбору и обработке телеметрической и баллистической информации, моделированию различных полетных ситуаций, а также расчету программно-командной информации (рабочих программ, разовых команд) для управления бортовой аппаратурой на многопроцессорном вычислительном комплексе (ВК) [1–4].

Существующие алгоритмы планирования вычислительных задач (ВЗ) исходят из предположения, что время выполнения известно заранее, а также базируются на статистических моделях [5–7]. Однако поскольку расчет ВЗ на программно-аппаратных средствах ЦУП может выполняться в любое время, то из-за большого числа одновременно решаемых трудоемких задач время пребывания отдельной ВЗ возрастает. Это связано с тем, что в мультипроцессорных вычислительных системах реализован режим разделения времени для пакета задач, которые обслужи-

ваются одновременно [8, 9]. При этом время пребывания отдельной ВЗ возрастает при увеличении числа одновременно запущенных секторами управления задач.

В связи с этим при управлении большой группировкой КА возникает проблема равномерной загрузки вычислительных ресурсов ЦУП задачами операторов секторов управления на суточном интервале полета КА [10].

Под ресурсами в вычислительных системах обычно подразумеваются следующие характеристики: количество процессоров; объем оперативной и внешней памяти; сетевое оборудование для соединения с удаленными абонентами и др.

Поэтому обычно план работы ЦУП кроме месячного плана профилактических работ по техническому обслуживанию и ремонту программно-аппаратных средств (ПАС) должен включать разработку программы выполнения вычислительных задач (ПВВЗ) на вычислительных ресурсах (серверах) ЦУП. Схема технологии функционирования ЦУП КА представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема технологии функционирования центра управления полетами космических аппаратов

Примечание: составлено автором.

Во время сеансов связи с КА от наземных комплексов управления в ЦУП поступают траекторные измерения (ТИЗ), телеметрическая информация (ТМИ), контрольно-командная информация (ККИ), а также информация, предназначенная для потребителей, которая после обработки помещается в хранилище данных о состоянии КА, радиотехнических станциях (РТС) отдельных командно-измерительных комплексов (ОКИК).

На этапе планирования в соответствии с заданными суточными программами полета (СПП) и технологическими циклами управления (ТЦУ) на основе целевых данных и указаний, от которых зависит объем вычислительных задач на ресурсах ПАС ЦУП КА, секторами управления формируется программно-командная информация (ПКИ), а также временная диаграмма полета (ВДП).

На основе таблиц полетов КА осуществляется планирование работы наземного комплекса управления. Результат планирования оформляется в виде массива и записывается в архив базы данных оперативных планов наземного комплекса (ОПНК) управления, в котором перечислены сеансы управления КА с конкретными наземными радиотехническими средствами на суточном интервале времени.

К показателям, служащим в качестве критериев выбора эффективного варианта плана работы ЦУП, можно отнести среднюю загрузку процессоров, равномерность загрузки программно-аппаратных средств на интервалах технологических циклов управления КА, среднее время прохождения вычислительных заданий в ВК ЦУП, равномерность загрузки операторов активной работой на суточном интервале управления КА и др. [10, 11]. Обеспечение оперативности и устойчивости управления КА в режиме реального времени предъявляют высокие требования к эффективному использованию вычислительных ресурсов [6, 7].

Задача планирования комплекса вычислительных работ (задач) в рамках технологического цикла управления, последовательность выполнения которых представляется обычно в виде ориентированного графа (сети), относится к классу задач большой размерности теории расписания.

В научной литературе общая теория расписаний подробно освещается в работах [12, 13]. В работах [14–16] задача планирования взаимосвязанных работ, представленных в виде ориентированных графов на ограниченных ресурсах, сводится к задаче оптимального управления динамической системой.

В работе [16] логические ограничения в виде функции штрафа введены в правую часть дифференциальных уравнений, описывающих состояние работ, а в качестве минимизируемого функционала используется выпуклая при некоторых допущениях функция суммарных отклонений между заданными и фактическими значениями фазовых переменных состояний работ.

Для моделей с дискретным временем и дискретным пространством состояний наибольшее применение получили методы динамического программирования и только в частном случае для марковских динамических задач [17] – методы дискретной оптимизации [18].

В предлагаемой статье в рамках динамической модели для уменьшения размерности пространства состояний при расчете рекуррентных уравнений применена идея тупиковых управлений, под которыми понимается допустимое управление, в котором увеличение интенсивности выполнения хотя бы одной из работ делает его недопустимым по ресурсным ограничениям [19]. Идея тупиковых управлений взята из задачи минимизации и получения сокращенной (тупиковой) дизъюнктивной нормальной формы, представляющей из себя произвольную дизъюнкцию элементарных конъюнкций логических функций булевой алгебры, которую нельзя упростить [20].

В конце статьи суть алгоритма тупиковых управлений, лежащего в основе формирования ПВВЗ, проиллюстрирована примером расчета рабочей программы, состоящей из подпрограмм, для закладки на борт КА во время сеанса связи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Модель планирования работ в вычислительной системе ЦУП КА

Пусть ЦУП обеспечивает централизованное управление орбитальной группировкой КА нескольких типов на заданном (суточном)

интервале времени $T = [t_0, t_f)$, которую представим в виде семейства множеств:

$$A = \{A_l : l \in L\}, L = \overline{1, n_A},$$

где n_A – число типов КА;

$A_l = \{A_{la} : a = 1, 2, \dots, n_{A_l}\}$ – множество КА различного назначения (типа);

n_{A_l} – число КА l -го типа.

Обозначим через $N_{A_l}(T)$ – число выполняемых технологических циклов управления КА l -го типа в интервале времени $T = [t_0, t_f)$.

Тогда пропускная способность ЦУП на заданном интервале времени будет характеризоваться вектором:

$$N(T) = (N_{A_1}(T), N_{A_2}(T), \dots, N_{A_l}(T), \dots, N_{A_{n_A}}(T)). \quad (1)$$

Обозначим через:

$\Theta = \{\theta_l : l \in L\}$ – множество операторов секторов управления, управляющих КА l -го типа;

$M = \{1, 2, \dots, m, \dots, n_M\}$ – множество программно-аппаратных средств вычислительной системы (ВС), включая сервера локальной сети, аппаратуру системы связи и передачи данных и т. п.;

$Z_l = \{z_s^l : s = \overline{1, n_{Z_l}}\}$ – комплекс частично упорядоченных вычислительных задач (работ, заданий, технологических операций) для формирования программно-командной информации для управления КА l -го типа на суточном интервале времени $T = [t_0, t_f)$.

Логическую структуру, т. е. взаимосвязи между вычислительными работами (технологическими операциями), определяющие порядок их выполнения для КА l -го типа, представим в виде пары:

$$\Gamma_{las} = \langle \Gamma_{las}^-, \Gamma_{las}^+ \rangle,$$

где $\Gamma_{las}^- = \{z_q^{la} \in Z_l \mid z_q^{la} \prec z_s^{la}\}$ – множество z_q^{la} задач, непосредственно предшествующих выполнению z_s^{la} задаче;

$\Gamma_{las}^+ = \{z_q^{la} \in Z_l \mid z_s^{la} \prec z_q^{la}\}$ – множество z_q^{la} задач, непосредственно следующих за выполнением z_s^{la} задачи.

Комплекс вычислительных задач для управления a -м КА l -го типа на суточном интервале времени $T = [t_0, t_f)$ будем представлять в виде:

$$Z_{la} = \{z_s^{la} : s = \overline{1, n_{Z_{la}}}\}.$$

Множество индексов комплексов вычислительных задач для управления всей орбитальной группировки ЦУП КА представим в виде:

$$S = \bigcup_{l \in L} \bigcup_{a \in A_l} \{1, 2, \dots, n_{Z_{la}}\},$$

где $n_s = \sum_{l \in L} \sum_{a \in A_l} n_{Z_{la}}$ – число вычислительных задач комплексов.

Тогда исходные данные для формирования программы выполнения комплексов вычислительных задач на вычислительных ресурсах ЦУП представим в виде объединения комплексов вычислительных работ:

$$Z = \bigcup_{l=1}^{n_A} \bigcup_{a=1}^{n_{A_l}} \bigcup_{s=1}^{n_{Z_{la}}} \{z_s^{la}\}.$$

Для каждой вычислительной задачи $z_s^{la} \in Z$ считаем задан объем Q_s^{la} вычислений. Зная производительность Π_m вычислительного комплекса $m \in M$ и объем Q_s^{la} вычислительной задачи z_s^{la} , найдем длительность решения в монопольном режиме: $\tau_{ms}^{la} = \frac{Q_s^{la}}{\Pi_m} \forall z_s^{la} \in Z$.

Следует заметить, что длительность выполнения вычислительной задачи на конкретном вычислительном средстве (процессоре) легко определить экспериментально.

Объемы ресурсов (оперативной и внешней памяти), необходимых для выполнения вычислительной задачи, зададим в виде:

$$B_m = \{b_{ms}^{la} : m \in M\}.$$

Учитывая, что производительность зависит от вероятностно-надежностных характеристик m -го средства, то априорно можно утверждать, что длительность решения задачи в монопольном режиме на m -м средстве, рассматривая ее как случайную величину с произвольным законом распределения с вероятностью P_{rob} близкой к нулю, уклоняется от среднего значения $E(\tau_{ms}^{la})$ не менее

чем на $\pm 3\sigma_{\tau_{ms}^{la}}$ ($\sigma_{\tau_{ms}^{la}}$ – стандартное или среднеквадратическое отклонение случайной величины τ_{ms}^{la}) [21]:

$$P_{rob} \left[\left| \tau_{ms}^{la} - E(\tau_{ms}^{la}) \right| \geq 3\sigma_{\tau_{ms}^{la}} \right] < 0,003.$$

Поэтому с вероятностью, близкой к единице, можно предположить, что:

$$\tau_{ms}^{la} \in \left[\underline{\tau_{ms}^{la}}, \overline{\tau_{ms}^{la}} \right],$$

где $\underline{\tau_{ms}^{la}} = E(\tau_{ms}^{la}) - 3\sigma_{\tau_{ms}^{la}}$, $\overline{\tau_{ms}^{la}} = E(\tau_{ms}^{la}) + 3\sigma_{\tau_{ms}^{la}}$.

На практике можно ограничиться средним значением длительности выполнения технологической операции на m -м средстве. Исходя из этого формализованное задание на расчет программы выполнения вычислительных задач представим в виде кортежа:

$$\Phi = \left\langle Z; \Theta; \{\tau_{ms}^{la}\}_{m \in M}; \bigcup_{m \in M} \{b_{ms}^{la}\}_{s \in S}; T_{ms}^{lv} \right\rangle, \quad (2)$$

где $s \in S$, $a \in A_l$, $l \in L$.

2. Динамическая модель программного управления с выполнением вычислительных задач. Уравнения, описывающие выполнение задач

Пусть на планируемом временном (суточном) интервале $T = [t_0, t_f)$ для обеспечения целевого функционирования КА необходимо выполнить множество вычислительных задач (операций), формализованное задание которых с учетом состава и структуры программно-аппаратных средств представлено в виде кортежей (2). Каждой задаче $z_s^{la} \in Z_{la}$ с заданным для нее допустимым временным интервалом выполнения в момент времени $t \in T_s^{la}$ поставим в соответствие неотрицательную переменную величину $x_s^{la}(t) \in [0, 1]$, характеризующую долю (процент) выполненного объема этой задачи, и которую будем называть состоянием данной задачи. Задача $z_s^{la}(t)$ считается законченной, если:

$$x_s^{la}(t) = 1 \quad \forall s \in S, \quad a \in A_l, \quad l \in L. \quad (3)$$

При $0 < x_s^{la}(t) < 1$ операция выполнена частично. Корень уравнения (3) обозначим – t_{fs}^{la} . Он будет моментом завершения задачи. Момент начала выполнения операции обозначим – t_{0s}^{la} . Управление состоянием задачи z_s^{la} на интервале планирования будем осуществлять с помощью булевой переменной $u_{ms}^{la} \in \{0, 1\}$, которой дадим следующую интерпретацию:

$$u_{ms}^{la}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } z_s^{la} \text{ задача в момент времени } t \\ & \text{обслуживается } m\text{-м средством,} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

Средства, работающие в режиме разделения времени (мультипрограммирование, мультипроцессирование), в течение небольшого кванта времени δt циклически выделяются каждому требованию на выполнение задачи [8, 22].

Тогда количество в моменты поступления на обслуживание задач и в моменты ухода с обслуживания задач можно представить в виде функции времени:

$$N_m(t) = \sum_{s \in S} \sum_{a \in A_l} \sum_{l \in L} u_{ms}^{la}(t), \quad (4)$$

$$u_{ms}^{la}(t) = \{0, 1\},$$

где $t \in T = [t_1, t_2]$.

В течение интервала времени $[t_1, t_2]$ среднее число задач в m -й вычислительной системе составит: $\bar{N}_m(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} N_m(t) dt$.

Введем понятие скорости (интенсивности) выполнения (технологической) операции на программно-аппаратных средствах ЦУП КА.

Под скоростью (интенсивностью) выполнения z_s^{la} задачи на m -м (типе) средстве будем понимать скорость изменения доли выполняемого объема этой задачи в единицу времени.

При данном количестве (4) обслуживаемых задач m -м средством за время δt_m , равное промежутку времени между очередными циклическими моментами предоставления m -го средства в монопольное обслуживание

очередной задачи, доля выполненного объема составит $\delta t_m / \tau_{ms}^{la}$. Если предположить, что на отрезке времени длительностью δt_m число обслуживаемых задач не меняется, т. е. $N_m(\delta t) = \text{const}$, то отсюда весь Q_s^{la} объем z_s^{la} задачи (случай $x_s^{la} = 1$) будет выполнен в режиме разделения времени за время пребывания на обслуживании, например, равное $\tau_{ms}^{la} \times N_m(\delta t)$.

Однако учитывая, что число задач (4) в моменты поступления новых требований и (или) ухода обслуженных требований на выполнение задач флуктуирует во времени, то скорость выполнения каждой задачи на m -м средстве, работающем в режиме разделения времени, представим неоднородным дифференциальным уравнением с флуктуирующей во времени правой частью вида:

$$x_s^{la} = \sum_{m=1}^{n_M} \frac{1}{\tau_{ms}^{la}} \times \frac{1}{N_m(t)} \times u_{ms}^{la}(t) \forall s \in S, \quad (5)$$

$$a \in A_l, l \in L.$$

Величину, равную $1/N_m(t)$ в теории очередей применительно к исследованию вычислительных систем, называют скоростью обслуживания требований и обычно связывают с дисциплиной справедливого разделения (центрального) процессора (ресурса), которая была введена Клейнроком как предельный аналог циклической дисциплины обслуживания требований при $\delta t_m \rightarrow 0$ [8]. От системы уравнений (5) перейдем к разностным уравнениям первого порядка с переменным временным шагом квантования, длина которого определяется (выбирается) в процессе формирования программы выполнения задач на ВС ЦУП КА:

$$x_s^{la}(t_{k+1}) = x_s^{la}(t_k) + \frac{\Delta t_k}{\tau_{ms}^{la}} \times \frac{1}{N_m(t_n)} \times u_{ms}^{la}(t_k); \quad (6)$$

$$\forall (s, a, l),$$

где $x_s^{la}(t_n)$ состояние z_s^{la} задачи в момент времени $t_k \in T (k = 1, 2, \dots)$, когда происходит

скачок в скорости обслуживания на m -м средстве.

Нахождение управляющих переменных (воздействий) $u_{sm}^{la}(t)$ в виде кусочно-постоянных функций времени $u_{ms}^{la} = u_{ms}^{la}(t)$ на $t \in T = [t_0, t_f]$ равносильно построению графика выполнения вычислительных задач в интервальном виде для всех $z_s^{la} \in Z$:

$$T_s^{la}[u(t)] = \{[t_{0s}^{la}, t_{fs}^{la}] | u_{ms}^{la}(t) = 1, 0 \leq x_s^{la}(t) \leq 1\},$$

где t_{0s}^{la} – момент начала вычисления z_s^{la} задачи на m -м средстве;

t_{fs}^{la} – момент окончания вычисления z_s^{la} задачи.

Заметим, что длительность пребывания z_s^{la} задачи на обслуживании m -м средством, равная величине $\Delta_{ms}^{la} = t_{fs}^{la} - t_{0s}^{la}$, совпадает с длительностью τ_{sm}^{la} при решении в монопольном режиме вычислительного средства (модуля), превышает ее значение $\Delta_{ms}^{la} \geq \tau_{ms}^{la}$, если задача решается на средстве в режиме разделения времени с другими задачами.

Наряду с переменными, характеризующими состояние z_s^{la} задачи, введем переменные величины y_m , характеризующие задействие ПАС. Изменения состояний этих переменных запишем в дифференциальной и интегральной формах:

$$\dot{y}_m(t) = \sum_{l=1}^{n_A} \sum_{a=1}^{n_{A_l}} \sum_{s=1}^{n_{Z_{la}}} u_{ms}^{la}(t) \forall m \in M,$$

где $y_m(t) = \sum_{l=1}^{n_A} \sum_{a=1}^{n_{A_l}} \sum_{s=1}^{n_{Z_{la}}} \int_{t_0}^t u_{ms}^{la}(\tau) d\tau$ – переменная, которая характеризует общую продолжительность задействия средства с номером $m \in M$ задачами z_s^{la} на интервале управления $[t_0, t)$.

Переменные $\theta \in \Theta$, которые характеризуют время задействия операторов по управлению КА l -го типа, представим в дифференциальной и интегральной формах:

$$v_{l\theta} = \sum_{a=1}^{n_{Zla}} u_{\theta}^l(t) \forall \theta \in \Theta; v_{l\theta}(t) = \sum_{a=1}^{n_{Zla}} u_{\theta}^l(\tau) d\tau,$$

где $u_{\theta}^l = 1$, если оператор задействован по управлению КА l -го типа и $u_{\theta}^l(t) = 0$ – в противном случае.

Ограничения, накладываемые на выполнение задач

Ограничения, накладываемые на управляющие воздействия в нелинейной динамической модели с учетом особенностей выполнения задач, разобьем на следующие три группы.

1. Ресурсные ограничения, связанные с воздействием на время выполнения различных видов памяти, программных модулей и т. п. при решении z_s^{la} задачи на m -м средстве, представим в виде неравенств на объем b -го вида ресурса m -го средства (процессора), работающим в режиме разделения времени:

$$\sum_{l=1}^{n_A} \sum_{a=1}^{n_{A_l}} \sum_{s=1}^{n_{Zla}} b_{ms}^{la}(t) u_{ms}^{la}(t) \leq B_m(t) \forall m \in M,$$

где $b_{ms}^{la}(t)$ – требуемое количество b -го вида ресурса при выполнении z_s^{la} задачи при монопольном решении на m -м вычислительном средстве;

$B_m(t)$ – общее текущее количество ресурсов, выделяемое для выполнения задач на m -м вычислительном средстве.

2. Ограничения логического характера, определяющие очередность выполнения частично-упорядоченных задач, когда любая задача z_{ms}^{la} не может выполняться ($u_{ms}^{la}(t) = 0$) до завершения предшествующих $z_q^{la} \in \Gamma_{las}^-$, можно записать в виде равенства:

$$\sum_{m \in M} \sum_{z_{mq}^{la} \in \Gamma_{las}^-} (1 - x_{mq}^{la}(t)) \times u_{ms}^{la}(t) = 0 \forall s. \quad (7)$$

При этом переменная $x_s^{la}(t)$ состояния z_{ms}^{la} задачи на m -м средстве достигнет значения $x_s^{la}(t_{fs}^{la}) = 1$, где $t = t_{fs}^{la}$ – момент завершения:

$$x_s^{la}(t) = \sum_{m \in M_j^{va}} \frac{1}{\tau_{ms}^{la}} \times \int_{t_{0s}^{la}}^t \frac{1}{N_m(\tau)} \delta\tau,$$

по форме являются интегральными уравнениями состояния задачи для $t \geq t_{0s}^{la}$ и эквива-

лентны системе неоднородных дифференциальных уравнений (6).

3. Временные ограничения зададим в виде:

$$\begin{aligned} Td_s^{la} &= [t_{0s}^{la}, t_{fs}^{la}], Td_{0s}^{la} = [t_{0s}^{la}, t_{fs}^{la}), \\ Td_{fs}^{la} &= (t_{0s}^{la}, t_{fs}^{la}], \end{aligned} \quad (8)$$

где t_{0s}^{la} – начальный допустимый (директивный) момент времени выполнения;

t_{fs}^{la} – конечный допустимый (директивный) момент времени выполнения;

Td_s^{la} – фиксирован интервал времени выполнения;

Td_{0s}^{la} – фиксирован начальный (директивный) момент времени выполнения;

Td_{fs}^{la} – фиксирован конечный (директивный) момент времени выполнения.

Временные ограничения запишем в интегральной форме:

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{n_M} \sum_{a=1}^{n_{A_l}} \sum_{s=1}^{n_{Zla}} \int_{t_{0s}^{la}}^t u_{ms}^{la}(\tau) \delta\tau + \int_{t_{fs}^{la}}^t u_{ms}^{la}(\tau) \delta\tau = \\ = 0 \forall t \in T. \end{aligned}$$

Критерии оценки качества выполнения плана работы ЦУП КА

Качество плана работы ЦУП КА, включая программу выполнения вычислительных задач, будем оценивать набором критериев. В постановке задачи многокритериального выбора эффективного варианта плана работы часть критериев подлежат минимизации, а часть – максимизации.

Критерий времени окончания выполнения комплекса работ:

$$I_1 = \sum_{l=1}^{n_A} \sum_{a=1}^{n_{A_l}} \sum_{s=1}^{n_{Zla}} t_{fs}^{la}(u_{ms}^{la}(t)) \rightarrow \min_{u_{ml}(t)}$$

Критерий, отражающий пропускную способность ЦУП КА выполняемых технологических циклов управления (1) на интервале $T = [t_0, t_f]$, представим в виде:

$$I_2 = \sum_{l=1}^{n_A} \sum_{a=1}^{n_{A_l}} N_{A_{la}}(T) \rightarrow \max.$$

Критерий, отражающий равномерность загрузки вычислительными задачами средств (процессоров) ЦУП КА, представим в виде:

$$I_3 = \sum_{m=1}^{n_M} \left| y_m(t) - \frac{1}{n_M} \sum_{m=1}^{n_M} y_m(t) \right| \rightarrow \min,$$

где $t \in T = [t_0, t_f]$.

Критерий, отражающий равномерность загрузки операторов автоматизированных рабочих мест секторов управления КА, представим в виде:

$$I_4 = \left| \int_{t_0}^{t_f} v_\theta(t) dt - \frac{1}{n_A} \sum_{l=1}^{n_A} \int_{t_0}^{t_f} v_\theta(t) dt \right| \rightarrow \min.$$

Для задач, объединенных по технологии в комплексы, в качестве оптимизируемого критерия целесообразно минимизировать самое позднее окончание какой-либо работы комплекса для КА l -го типа:

$$I_5 = \max \left\{ \sum_{a=1}^{n_{A_l}} \sum_{s=1}^{n_{Z_{la}}} t_{fs}^{la} \right\} \rightarrow \min.$$

Пиковые нагрузки в рассматриваемой задаче расчета оптимальной программы вычислительных задач отразим при помощи функционала, минимизирующего на временном интервале планирования максимальные отклонения загрузки m -го средства:

$$I_6 = \max_{t', t'' \in T} |y_m(t') - y_m(t'')| \rightarrow \min.$$

В отдельных случаях приведенный список показателей эффективности программы выполнения задач может быть дополнен другими, учитывающими иные аспекты решаемой задачи.

3. Алгоритм тупиковых управлений

Состояние программы выполнения вычислительных задач на текущий момент времени $t_k \in T$ на m -м вычислительном средстве будет характеризоваться кортежем:

$$X_m(t_k) = \langle x_m(t_k), u_m(t_k) \rangle, m = \overline{1, n_M},$$

где $x_m(t_k) = (x_{m1}(t_k), \dots, x_{ms}(t_k), \dots, x_{mns}(t_k))$ – вектор состояния задач;

$u_m(t_k) = (u_{m1}(t_k), \dots, u_{ms}(t_k), \dots, u_{mns}(t_k))$ – вектор управляющих переменных.

Начальному состоянию программы на $m \in M$ комплексе соответствует нулевой вектор $x_m(t_0) = (0, 0, 0, \dots, 0)$, а конечному состоянию – вектор $x_m(t_f) = (1, \dots, 1)$.

Для компактной записи введем обозначения $x_s \equiv x_{ms}, u_s \equiv u_{ms}, \tau_s \equiv \tau_{ms}, b_s \equiv b_{ms}$. Исходные данные для каждой вычислительной задачи будем характеризовать кортежем $\langle \tau_s, b_s \rangle$, где τ_s – длительность решения задачи в монопольном режиме; b_s – требуемый объем оперативной памяти.

Краевые условия в рассматриваемой задаче программного управления выполнением вычислительных работ для КА на левом и правом конце временного интервала представим в виде:

$$t = t_0 : x_s(t_0) = 0; t = t_f : x_s(t_f) = 1 \forall s \in S.$$

Таким образом, задача расчета оптимальной программы выполнения заданий по формированию ПКИ на программно-аппаратных средствах ЦУП сводится к поиску управлений $u_s(t)$, принадлежащих множеству $U(t)$ допустимых управляющих воздействий, удовлетворяющих заданным ресурсным, логическим и временным ограничениям.

Для компактной записи изложенного введем в рассмотрение вектор переменных состояний и управляющих переменных:

$$x(t) = (x_1(t), \dots, x_s(t), \dots, x_{ns}(t));$$

$$u(t) = (u_1(t), \dots, u_s(t), \dots, u_{ns}(t)).$$

Шаг 1. Формирование фронта вычислительных заданий. На $m \in M$ вычислительном средстве фронт заданий, удовлетворяющих логическим (7) и временным (8) ограничениям на t_k момент времени, представим в виде:

$$Z_m(t_k) = \{z_s : s = \overline{1, n_m}\}. \quad (9)$$

Шаг 2. Построение тупиковых управлений. Построение тупиковых управлений начинается с упорядочения номеров вычислительных

заданий в порядке убывания требуемых объемов оперативной памяти вычислительного ресурса.

Пусть $b_1 \geq \dots \geq b_s \geq \dots \geq b_{n_m}$. В первое тупиковое управление в момент времени $t_k \in T$ включаем первую вычислительных задачу, что соответствует управлению $u_1(t_k) = 1$, если он не нарушает ограничения на объем оперативной памяти:

$$\sum_{s=1}^{n_m} b_s u_s \leq B_m, u_s \in \{0, 1\}, s = 1, 2, \dots, n_m, \quad (10)$$

т. е. выполняется неравенство $b_1 u_1(t_k) \leq B_m$, в противном случае полагаем $u_1(t_k) = 0$.

Точно так же поступаем со второй, третьей и s -й вычислительной задачей в соответствии с формулой:

$$u_s = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{j=1}^s b_j u_j \leq B_m; \\ 0, & \text{если } \sum_{j=1}^s b_j u_j > B_m \end{cases} \quad (11)$$

последовательно для $i = 1, 2, \dots, n_m$.

В результате получим первое тупиковое управление, состоящее из нулей и единиц, которое будем обозначать в виде (геометрического) вектора:

$$\vec{u}_1 = (u_1^{(1)}, u_2^{(1)}, \dots, u_{n_m}^{(1)}). \quad (12)$$

Построенному вектору управления (12) соответствует некоторое двоичное число $\xi_1 = (11010\dots 1\dots 01001)$, где единицы стоят в тех разрядах, номера которых совпадают с номерами задач, включенных в управление. Замена любого нуля единицей делает это управление недопустимым по ограничению (10).

С помощью первого тупикового управления построим второе. Для этого найдем самый младший разряд числа ξ_1 , в котором записан ноль. Во всех разрядах справа от него вместо единиц записываем нули. В полученном двоичном числе первую справа единицу перенесем на один разряд вправо. Если полученное управление недопустимо по ограничению (10), то эту единицу сдвигаем еще на один разряд вправо до тех пор, пока управление не окажется допустимым. Далее в раз-

ряды справа от этой единицы помещаем единицы по тому же правилу (11), что и при построении числа ξ_1 . В результате получаем двоичное число $\xi_2 < \xi_1$. Этому числу соответствует тупиковое управление:

$$\vec{u}_2 = (u_1^{(2)}, u_2^{(2)}, \dots, u_{n_m}^{(2)}). \quad (13)$$

Точно таким же образом из тупикового управления (14) строится тупиковое управление \vec{u}_3 , которому соответствует двоичное число $\xi_3 < \xi_2 < \xi_1$ и т. д. В результате получаем множество тупиковых управлений:

$$U = \{\vec{u}_i = (u_1^{(i)}, \dots, u_j^{(i)}, \dots, u_{n_U}^{(i)}) \mid i = 1, 2, \dots, n_U\}, \quad (14)$$

которому соответствует упорядочение $\xi_{n_U} < \xi_{n_U-1} < \dots < \xi_3 < \xi_2 < \xi_1$ двоичных чисел. Описанная процедура дает возможность получить все тупиковые управления, удовлетворяющие ограничению (11).

Шаг 3. Вычисление оптимального тупикового управления. За пошаговый критерий процесса планирования заданий на текущий момент времени $t_k \in T$ на m -м вычислительном средстве примем минимизацию времени выполнения фронта вычислительных заданий $Z_m(t_k)$ (9):

$$F(u_1^*, \dots, u_{n_U}^*) = \min_{u_1, \dots, u_{n_U}} \sum_{s=1}^{n_U} \tau_s(t_k) u_s, \quad (15)$$

$$\sum_{s=1}^{n_U} b_s u_s \leq B_m,$$

где $\tau_s(t_k) = \tau_s \times [1 - x_s(t_k)]$ – оставшееся время решения задачи, поступившей на обслуживание ($0 < x_s(t_k) < 1; u_s = 1$).

Для каждого тупикового управления $\vec{u}_i \in U$ находим значение шагового критерия (15). За оптимальное управление принимаем тупиковое $\vec{u}_* \in U$, обеспечивающее минимальное значение шагового критерия (15):

$$\vec{u}_* = (u_1^*, \dots, u_s^*, \dots, u_{n_m}^*) = \arg \max_{u_i \in U} F(u_1^{(i)}, \dots, u_s^{(i)}, \dots, u_{n_U}^{(i)}).$$

Шаг 4. Вычисление переменного шага квантования для тупикового управления. Из рекуррентного уравнения (6) временный шаг квантования находим из условия:

$$\Delta t_k = \min_s \{ \tau_s N_m(t_k) [1 - x_s(t_k)] u_s^*(t_k) \}, \quad (16)$$

откуда очередной дискретный момент времени: $t_{k+1} = t_k + \Delta t_k$.

В выражении (16) величина $\tau_s N_m(t_k)$ означает время пребывания на обслуживании z_s задачи при условии, что в режиме разделения времени процессора число обслуживаемых задач равно $N_m(t_k)$, а $[1 - x_s(t_k)]$ – оставшаяся доля, характеризующая состояние задачи.

Шаг 5. Вычисление переменных состояний программы по рекуррентной формуле (6):

$$x_s(t_{k+1}) = x_s(t_k) + \frac{\Delta t_k}{\tau_s} \times \frac{1}{n_m(t_k)} \times u_s^*(t_k).$$

Шаг 6. Проверка условия окончания объема выполнения вычислительных задач. Если в дискретный момент времени $t_k = t_f$ выполняется условие: $x_s(t_f) = 1 \forall s \in S = \bigcup_{l \in L} \bigcup_{a \in A_l} \{1, 2, \dots, n_{Z_{la}}\}$, то процесс формирования программы окончен и каждой вычислительной задаче задается интервал ее выполнения на m -м вычислительном средстве:

$$T[u_{ms}^{la}(t)] = [t_{0s}^{la}, t_{fs}^{la}].$$

Интервал времени выполнения сектором управления комплекса задач Z_{la} (2) для a -го КА задается в виде $T_{la} = [t_0^{la}, t_f^{la}]$, где $t_0^{la} = \min_s t_{0s}^{la}$ – срок начала выполнения комплекса задач Z_{la} (2), поступивших на обслуживание; $t_f^{la} = \max_s t_{fs}^{la}$ – конечный срок выполнения комплекса задач.

Задача (15) носит название «задача о рюкзаке» и относится к классу NP-трудных задач комбинаторной оптимизации [23–25]. Математическое обоснование оптимальности изложенного алгоритма тупиковых управлений базируются на следующей теореме.

Теорема (о существовании оптимального решения). Среди всех тупиковых управлений из множества (14) найдется по крайней мере одно тупиковое управление, обеспечивающее минимум целевой функции задачи (15).

Доказательство. Доказательство теоремы о существовании оптимального решения на минимум критерия (15) проведем по схеме доказательства «задачи о рюкзаке» на максимум целевой функции [19]. Пусть \vec{u}_* – оптимальное тупиковое управление, обеспечивающее минимум критерию (15).

Предположим обратное, что \vec{u}_* не является оптимальным и тупиковым управлением, т. е. $\vec{u}_* = (u_1^{(*)}, \dots, u_s^{(*)}, \dots, u_{n_m}^{(*)}) \notin U$. Дополним его до тупикового $\vec{u}_0 = (u_1^{(0)}, \dots, u_s^{(0)}, \dots, u_{n_m}^{(0)}) \in U$. Это значит, что найдется вычислительная задача $z_{s_0} \in Z_m(t_k)$, которая будет включена на обслуживание, и значение критерия (15) при этом увеличится на величину времени τ_{s_0} выполнения этой вычислительной задачи. Тогда будет выполняться неравенство:

$$F(u_1^{(*)}, \dots, u_s^{(*)}, \dots, u_{n_u}^{(*)}) < F(u_1^{(0)}, \dots, u_s^{(0)}, \dots, u_{n_u}^{(0)}).$$

Следовательно, предположение о неоптимальности \vec{u}_* неверно, что и требовалось доказать. Легко видеть, что вычислительные задачи, назначаемые на обслуживание в соответствии с критерием (15), частично упорядочиваются по возрастанию заданного времени τ_s выполнения задачи z_s [26, с. 40–42], что, в свою очередь, обеспечивает минимум критерия I_1 – минимизации времени окончания выполнения комплекса работ [26].

4. Выбор плана работы ЦУП КА с учетом варьирования данных и факторов неопределенностей

На начальном этапе планирования работы ЦУП КА необходимо сгенерировать различные варианты использования вычислительных ресурсов с учетом статистических данных о нештатных ситуациях, которые будем представлять в виде множества альтернативных планов:

$$V = \{v_\gamma(x, u, y, \theta) : \gamma = 1, 2, \dots, n_V\},$$

$$F(v_1, \dots, v_{n_V}) = \sum_{j=1}^{n_I} w(I_j) d_j^{(\gamma)},$$

где x – вектор переменных состояния вычислительных задач;

u – вектор управляющих переменных;

y – вектор загрузки вычислительных средств;

θ – вектор загрузки операторов секторов управления.

Тогда математическая постановка задачи многокритериального оценивания вариантов плана ЦУП КА сводится к задаче векторной оптимизации [18]:

$$I(v_\gamma) = (I_1(v_\gamma), I_2(v_\gamma), \dots, I_6(v_\gamma)) \rightarrow \text{extr}_{v_\gamma \in V},$$

где $d_j^{(\gamma)} = I_j(v_\gamma)$ – оценка плана по I_j -критерию;

$\gamma = 1, 2, \dots, n_I$ ($n_I = 6$).

Для задач многокритериального оценивания обычно применяется аддитивный механизм агрегирования данных [18]:

где $w(I_j)$ – количественный вес важности I_j критерия. Чтобы применение аддитивного механизма агрегирования данных было корректным, необходимо от исходных оценок по каждому критерию перейти к результирующей однородной шкале [27]. В этом случае выбор эффективного варианта осуществляется по обобщенным $r_\Sigma^{(\gamma)} = \sum_{j=1}^{n_I} w(I_j) r_j^{(\gamma)}$

оценкам, где $r_j^{(\gamma)}$ – оценка v_γ варианта плана по I_j -критерию в результирующей шкале. Веса важности критериев определяются с применением экспертных методов по матрице парных сравнений [28].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим пример решения задачи интервального планирования комплекса задач методом тупиковых управлений, граф выполнения которых представлен на рис. 2.

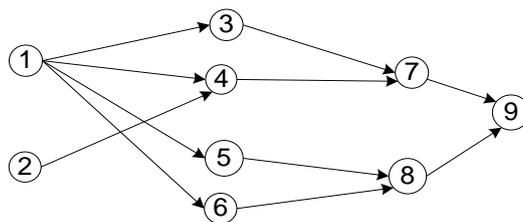


Рис. 2. Граф выполнения комплекса работ

Примечание: составлено автором.

Исходные модельные (условные) данные представлены в табл. 1 для расчета интервалов для 9 заданий, выполняющихся на вычислительном средстве. Максимальный объем

выделяемого ресурса положим равным $B = 180$ для любого $t \in T = [0, t_f)$. Краевые условия для этой задачи запишем в виде: $\vec{x}(0) = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$; $\vec{x}(t_f) = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$.

Таблица 1

Исходные данные для расчета интервалов

№	Перечень задач, формирующих ПКИ для БА КА	τ_s – время выполнения, в усл. ед. времени	b_s – объем ресурса (оперативной памяти), в усл. ед. памяти
1	Формирование массива данных	1	48
2	Расчет подмассива НИ	3	98
3	Расчет подмассива СС	2	68
4	Расчет подмассива ПСБ	4	60
5	Расчет баллистических параметров	4	62
6	Расчет режимов работы БА КА	3	59
7	Расчет расхода бортовых ресурсов	2	84
8	Формирование ВДП	6	60
9	Компоновка РП	3	32

Примечание: составлено автором. ПКИ – программно-командная информация; БА КА – бортовая аппаратура космического аппарата; НИ – навигационная информация; СС – сеансы связи; ПСБ – панель солнечной батареи; ВДП – временная диаграмма полета; РП – рабочая программа.

Ресурсные ограничения, накладываемые на управляющие переменные, запишем в виде:

$$\sum_{l=1}^{n_U} b_l u_l(t_k) \leq 180 \forall t_k \in T = [0, t_f).$$

Расчет алгоритмом тупиковых управлений

Итерация 1. На шаге 1 для $t_0 = 0$ имеем фронт заданий $Z(t_0) = \{z_1, z_2\}$, удовлетворяющий логическим ограничениям, с которыми отождествим переменные состояния задач:

$$\bar{x}(t_0) = (x_1(0), x_2(0)) = (0, 0).$$

На шаге 2 и 3 имеем единственное тупиковое управление: $\bar{u}(t_0) = (u_1(0), u_2(0)) = (1, 1)$, удовлетворяющее ресурсному ограничению: $48u_1(0) + 98u_2(0) = 146 < 180$.

На шаге 4 вычисляем переменный шаг квантования для $N(t_0) = 2$ задач:

$$\begin{aligned} \Delta t_0 &= \min_{l \in \{1, 2\}} \{ \tau_s N(t_0) [1 - x_l(0)] \} = \\ &= \min_{l \in \{1, 2\}} \left\{ \begin{array}{l} 1 \times 2 \times [1 - 0] \\ 3 \times 2 \times [1 - 0] \end{array} \right\} = \min_{l \in \{1, 2\}} \left\{ \begin{array}{l} 2 \\ 6 \end{array} \right\} = 2, \end{aligned}$$

тогда дискретный момент времени: $t_1 = t_0 + \Delta t_0 = 2$. Далее на шаге 5 вычисляем значения переменных состояния программы по формуле:

$$x_l(t_{k+1}) = x_l(t_k) + \frac{\Delta t_k}{\tau_s \times N(t_k)} \times u_l(t_k). \quad (17)$$

Имеем $\bar{x}(t_1) = (x_1(2), x_2(2)) = \left(1, \frac{1}{3}\right)$, где

$$x_1(2) = 0 + \frac{2}{1 \times 2} \times 1 = 1; \quad x_2(2) = 0 + \frac{2}{3 \times 2} \times 1 = \frac{1}{3}.$$

Так как критерий останова не выполняется, то перейдем на шаг 1.

Итерация 2. На шаге 1 для $t_1 = 2$ фронт заданий $Z(t_1) = \{z_2, z_3, z_5, z_6\}$, удовлетворяющих логическим ограничениям, с которыми отождествим переменные состояния задач:

$$\bar{x}(t_1) = (x_2(2), x_3(2), x_5(2), x_6(2)) = \left(\frac{1}{3}, 0, 0, 0\right).$$

На шаге 2 построение тупиковых управлений начинается с упорядочения номеров задач в порядке убывания весов: $b_2 \geq b_3 \geq b_5 \geq b_6 \Leftrightarrow 98 > 68 > 62 > 59$, в результате чего получаем три тупиковых управлений для задач z_2, z_3, z_5, z_6 :

$$\begin{aligned} \bar{u}_1(2) &= (1, 1, 0, 0); \quad \bar{u}_2(2) = (1, 0, 1, 0); \\ \bar{u}_3(2) &= (1, 0, 0, 1). \end{aligned}$$

Необходимо заметить, что тупиковыми являются и управления:

$$\bar{u}_4(2) = (0, 1, 1, 0), \quad \bar{u}_5(2) = (0, 0, 1, 1),$$

которые исключаем из рассмотрения, так как в них не входит еще незаконченная z_2 задача.

На шаге 3 за оптимальное принимаем тупиковое $\bar{u}_1(2) = (1, 1, 0, 0)$, обеспечивающее минимальное значение пошаговому критерию (15):

$$F(\bar{u}_i(t_k)) = \sum_{s=1}^n \tau_s(t_k) u_s^{(i)}(t_k),$$

где $\tau_2(2) = 3 \times \left[1 - \frac{1}{3}\right] = 2$ (табл. 2).

Таблица 2

Тупиковые управления итерации 2

№	Тупиковые управления	$\sum_{s=1}^{n_U} b_s u_s^{(i)}(2) \leq 180$	$F(\bar{u}_i(2))$
1	$\bar{u}_1(2) = (1, 1, 0, 0)$	$98 + 68 = 166$	$2 + 2 = 4$
2	$\bar{u}_2(2) = (1, 0, 1, 0)$	$98 + 62 = 160$	$2 + 4 = 6$
3	$\bar{u}_3(2) = (1, 0, 0, 1)$	$98 + 58 = 156$	$2 + 3 = 5$

Примечание: составлено автором.

На шаге 4 вычисляем переменный шаг квантования для $N(t_1) = 2$ задач z_2, z_3 :

$$\Delta t_1 = \min_{l \in \{2, 3\}} \{ \tau_s N(t_1) [1 - x_l(2)] \} = \min_{l \in \{2, 3\}} \left\{ \begin{array}{l} 3 \times 2 \times \left[1 - \frac{1}{3}\right] \\ 2 \times 2 \times [1 - 0] \end{array} \right\} = 4,$$

тогда дискретный момент времени: $t_2 = t_1 + \Delta t_1 = 6$.

Далее на шаге 5 вычисляем значения переменных состояния программы по формуле (17).

Имеем $\bar{x}(t_2) = (x_2(6), x_3(6)) = (1, 1)$, где $x_2(6) = \frac{1}{3} + \frac{4}{3 \times 2} \times 1 = 1; \quad x_3(6) = 0 + \frac{4}{2 \times 2} \times 1 = 1$.

Так как критерий останова не выполняется, то перейдем на шаг 1.

Итерация 3. На шаге 1 для $t_2 = 6$ имеем фронт заданий $Z(t_2) = \{z_4, z_5, z_6\}$, удовлетворяющих логическим ограничениям, с которыми отождествим переменные состояния задач:

$$\bar{x}(t_2) = (x_4(6), x_5(6), x_6(6)) = (0, 0, 0).$$

На шаге 2 построение тупиковых управлений начинается с упорядочения номеров за-

дач в порядке убывания весов: $b_4 \geq b_5 \geq b_6 \Leftrightarrow 60 > 62 > 59$, в результате чего получаем три тупиковых управления для задач z_4, z_5, z_6 : $\bar{u}_1(6) = (1, 1, 0)$; $\bar{u}_2(6) = (1, 0, 1)$; $\bar{u}_3(6) = (0, 1, 1)$.

На шаге 3 за оптимальное принимаем тупиковое $\bar{u}_2(6) = (1, 0, 1)$, обеспечивающее минимальное значение пошаговому критерию (табл. 3).

Таблица 3

Тупиковые управления итерации 3

№	Тупиковые управления	$\sum_{s=1}^{mU} b_s u_s^{(i)}(6) \leq 180$	$F(\bar{u}_i(6))$
1	$\bar{u}_1(6) = (1, 1, 0)$	$60 + 62 = 122$	$4 + 4 = 8$
2	$\bar{u}_2(6) = (1, 0, 1)$	$60 + 59 = 119$	$4 + 3 = 7$
3	$\bar{u}_3(6) = (0, 1, 1)$	$62 + 59 = 121$	$4 + 3 = 7$

Примечание: составлено автором.

На шаге 4 вычисляем переменный шаг квантования для $N(t_2) = 2$ задач z_4, z_6 :

$$\begin{aligned} \Delta t_2 &= \min_{l \in \{4, 6\}} \{ \tau_s N(t_2) [1 - x_l(6)] \} = \\ &= \min_{l \in \{4, 6\}} \left\{ \begin{array}{l} 4 \times 2 \times [1 - 0] \\ 3 \times 2 \times [1 - 0] \end{array} \right\} = 6, \end{aligned}$$

тогда дискретный момент времени: $t_3 = t_2 + \Delta t_2 = 12$. Далее на шаге 5 вычисляем значения переменных состояния программы по формуле (17). Имеем:

$$\bar{x}(t_3) = (x_4(12), x_6(12)) = \left(\frac{3}{4}, 1 \right),$$

где $x_4(12) = 0 + \frac{6}{4 \times 2} \times 1 = \frac{3}{4}$; $x_6(12) = 0 + \frac{6}{6 \times 2} \times 1 = 1$.

Так как критерий останова не выполняется, то перейдем на шаг 1.

Итерация 4. На первом шаге для $t_3 = 12$ имеем фронт заданий $Z(t_3) = \{z_4, z_5\}$, удовлетворяющих логическим ограничениям, с которыми отождествим переменные состояния задач:

$$\bar{x}(t_3) = (x_4(12), x_5(12)) = \left(\frac{3}{4}, 0 \right).$$

На шаге 2 и 3 имеем управление: $\bar{u}(t_3) = (u_4(12), u_5(12)) = (1, 1)$, удовлетворяющее ре-

сурсному ограничению: $60u_4(12) + 62u_5(12) = 122 < 180$.

На шаге 4 вычисляем переменный шаг квантования для $N(t_3) = 2$ задач z_4, z_5 :

$$\begin{aligned} \Delta t_3 &= \left\{ \min_{l \in \{4, 5\}} \{ \tau_s N(t_3) [1 - x_l(12)] \} \right\} = \\ &= \min_{l \in \{4, 5\}} \left\{ \begin{array}{l} 4 \times 2 \times \left[1 - \frac{3}{4} \right] \\ 4 \times 2 \times [1 - 0] \end{array} \right\} = 2, \end{aligned}$$

тогда дискретный момент времени: $t_4 = t_3 + \Delta t_3 = 14$. Далее на шаге 5 вычисляем значения переменных состояния программы по формуле (17). Имеем:

$$\bar{x}(t_4) = (x_4(14), x_5(14)) = \left(1, \frac{1}{4} \right),$$

где $x_4(14) = \frac{3}{4} + \frac{2}{4 \times 2} \times 1 = 1$; $x_5(14) = 0 + \frac{2}{4 \times 2} \times 1 = \frac{1}{4}$.

Так как критерий останова не выполняется, то перейдем на шаг 1.

Итерация 5. На шаге 1 для $t_4 = 14$ имеем фронт заданий $Z(t_4) = \{z_5, z_7\}$, удовлетворяющих логическим ограничениям, с которыми отождествим переменные состояния задач:

$$\bar{x}(t_4) = (x_5(14), x_7(14)) = \left(\frac{1}{4}, 0 \right).$$

На шаге 2 и 3 имеем управление: $\vec{u}(t_4) = (u_5(14), u_7(14)) = (1, 1)$, удовлетворяющее ограничению: $62u_5(14) + 84u_7(14) = 146 < 180$.

На шаге 4 вычисляем переменный шаг квантования для $N(t_4) = 2$ задач:

$$\Delta t_4 = \{ \min \{ \tau_s N(t_4) [1 - x_l(14)] \} = \\ = \min_{l \in \{5, 7\}} \left\{ \begin{array}{l} 4 \times 2 \times \left[1 - \frac{1}{4} \right] \\ 2 \times 2 \times [1 - 0] \end{array} \right\} = 4,$$

тогда дискретный момент времени: $t_5 = t_4 + \Delta t_4 = 18$. Далее на шаге 5 вычисляем значения переменных состояния программы по формуле (17). Имеем:

$$\vec{x}(t_5) = (x_5(18), x_7(18)) = \left(\frac{3}{4}, 1 \right),$$

где $x_5(18) = \frac{1}{4} + \frac{4}{4 \times 2} \times 1 = \frac{3}{4}$; $x_7(18) = 0 + \frac{4}{2 \times 2} \times 1 = 1$.

Так как критерий останова не выполняется, то перейдем на шаг 1.

Итерация 6. На первом шаге для $t_5 = 18$ имеем фронт заданий $Z(t_5) = \{z_5\}$, удовлетворяющих логическим ограничениям, с которыми отождествим переменные состояния задач:

$$\vec{x}(t_5) = (x_5(18)) = \left(\frac{3}{4} \right).$$

На шаге 2 и 3 имеем управление: $\vec{u}(t_5) = (u_5(18)) = (1)$, удовлетворяющее ограничению: $60u_5(18) = 60 < 180$.

На шаге 4 вычисляем переменный шаг квантования для $N(t_5) = 1$ задач:

$$\Delta t_5 = 4 \times 1 \times \left[1 - \frac{3}{4} \right] = 1,$$

тогда дискретный момент времени: $t_6 = t_5 + \Delta t_5 = 19$. Далее на шаге 5 вычисляем значения переменных состояния программы по формуле (17). Имеем:

$$\vec{x}(t_6) = (x_5(t_6)) = (1),$$

где $x_5(19) = \frac{3}{4} + \frac{1}{4 \times 1} \times 1 = 1$.

Итерация 7. На первом шаге для $t_6 = 19$ имеем фронт заданий $Z(t_6) = \{z_8\}$, удовлетворяющих логическим ограничениям, с которыми отождествим переменные состояния задач:

$$\vec{x}(t_5) = (x_8(18)) = (0).$$

На шаге 2 и 3 имеем управление: $\vec{u}(t_5) = (u_8(18)) = (1)$, удовлетворяющее ограничению: $60u_8(18) = 60 < 180$.

На шаге 4 вычисляем переменный шаг квантования для $N(t_5) = 1$ задач:

$$\Delta t_6 = 6 \times 1 \times [1 - 0] = 6,$$

тогда дискретный момент времени: $t_7 = t_6 + \Delta t_6 = 25$. Далее на шаге 5 вычисляем значения переменных состояния программы по формуле (17). Имеем:

$$\vec{x}(t_6) = (x_8(t_6)) = (1),$$

где $x_8(25) = 0 + \frac{6}{6 \times 1} \times 1 = 1$.

Так как критерий останова не выполняется, то перейдем на шаг 1.

Итерация 8. На шаге 1 для $t_7 = 25$ имеем одну задачу $Z(t_6) = \{z_9\}$, удовлетворяющую логическим ограничениям, с которыми отождествим переменные состояния – $x_9(t_6) = 0$.

На шаге 2 и 3 имеем управление: $u_9(t_7) = 1$, удовлетворяющее ограничению:

$$32u_9(t_6) = 32 < 180.$$

На шаге 4 вычисляем переменный шаг квантования для задачи $z_9(N(t_6) = 1)$:

$$\Delta t_7 = 3 \times 1 \times [1 - 0] = 3,$$

тогда дискретный момент времени: $t_8 = t_7 + \Delta t_7 = 28$. Далее $x_9(28) = 0 + \frac{3}{3 \times 1} \times 1 = 1$. Поскольку выполняется краевое условие $\vec{x}(t_f) = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$, для $t_f = 28$, то останов. Результаты вычислений алгоритма тупиковых управлений представлены в табл. 4–5.

Таблица 4

Результаты расчетов

№ итерации	t_k	Оптимальное тупиковое управление $u(t_k)$	Вектор состояния операций $x(t_k)$
1	0	$\bar{u}(0) = (1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$	$\bar{x}(0) = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$
2	2	$\bar{u}(2) = (0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$	$\bar{x}(2) = (1, 1/3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$
3	6	$\bar{u}(6) = (0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0)$	$\bar{x}(6) = (1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$
4	12	$\bar{u}(12) = (0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0)$	$\bar{x}(12) = (1, 1, 1, 3/4, 0, 1, 0, 0, 0)$
5	14	$\bar{u}(14) = (0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0)$	$\bar{x}(14) = (1, 1, 1, 1, 1/4, 1, 0, 0, 0)$
6	18	$\bar{u}(18) = (0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0)$	$\bar{x}(18) = (1, 1, 1, 1, 3/4, 1, 1, 0, 0)$
7	19	$\bar{u}(19) = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0)$	$\bar{x}(19) = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0)$
8	25	$\bar{u}(25) = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)$	$\bar{x}(25) = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0)$
9	28	z	$\bar{x}(28) = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$

Примечание: составлено автором.

Таблица 5

Интервалы выполнения работ

№	Перечень задач, формирующих ПКИ для БА КА	Начало поступления задачи в ВС, усл. ед. времени	Окончание обслуживания задачи в ВС, усл. ед. времени	Длительность интервала обслуживания, усл. ед. времени
1	Формирование массива данных	0	2	2
2	Расчет подмассива НИ	0	6	6
3	Расчет подмассива СС	2	6	4
4	Расчет подмассива ПСБ	6	14	8
5	Расчет баллистических параметров	12	19	7
6	Расчет режимов работы БА КА	6	12	6
7	Расчет расхода бортовых ресурсов	14	18	4
8	Формирование ВДП	19	25	6
9	Компоновка РП	25	28	3

Примечание: составлено автором. Расшифровку аббревиатур см. в примечаниях к табл. 1.

Из табл. 5 следует, что для заданий $z_1 \div z_7$ длительность интервала нахождения в ВС превышает время решения задач при монопольном обслуживании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье показано, что в основе планирования работы ЦУП КА по многим критериям, в частности разработки программы выполнения вычислительных задач, лежит динамическая модель с тупиковыми управлениями, ориентированная прежде всего на снижение вычислительной сложности решения задач, относящихся к классу задач теории расписаний большой размерности. Как показано в данной статье, ветвящийся процесс управления набором заданий сводится на каждом шаге к решению комбинаторной «задачи о рюкзаке», отно-

сящейся к классу NP-полных, временную сложность вычислений которой можно оценить как $O(2^n)$ за n шагов алгоритма.

Для моделей с дискретным временем и дискретным пространством состояний наибольшее применение получили методы динамического программирования, которые требуют большого объема оперативной памяти для запоминания на каждом шаге переменных состояний, что затрудняет решение динамических задач при высокой размерности множества состояний.

Достоинствами метода тупиковых управлений являются его вычислительная простота и более высокое быстродействие по сравнению с известными алгоритмами, что позволяет решать с его помощью характерные для практики задачи большой размерности.

Список источников

References

1. Нагибин С. Я., Почукаев В. Н., Ухлинов Л. М. Структура и принципы построения математического обеспечения Центра управления полетами космических аппаратов // Вестник Российского общества информатики и вычислительной техники. 1995. Вып. 5. С. 66–72.
2. Мануйлов Ю. С., Калинин В. Н. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления. СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. 609 с.
3. Калинин В. Н. Математическая модель информационного взаимодействия космического аппарата с поверхностью земли // Труды СПИИРАН. 2014. № 3. С. 33–56.
4. Мануйлов Ю. С., Москвин Б. В., Павлов Д. А. Модель планирования распределенной обработки информации в различных звеньях автоматизированных систем управления космическими аппаратами // Труды ВКА им. А. Ф. Можайского. 2014. № 642. С. 32–35.
5. Командровский В. Г. О планировании работ в вычислительной системе // Автоматика и телемеханика. 2005. Вып. 12. С. 65–74.
6. Голубев И. А. Планирование задач в распределённых вычислительных системах на основе метаданных : дис. ... канд. техн. наук. СПб. : Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2014. 135 с.
7. Broberg J. A. Effective task assignment strategies for distributed systems under highly variable workloads. Dr. (Philosophy) Thesis. Melbourne, Victoria, Australia: RMIT University; 2006. 208 p.
8. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / пер. с англ. под ред. Б. С. Цыбакова. М. : Мир, 1979. 600 с.
9. Баканов В. М. Многомашинные комплексы и многопроцессорные системы. М. : МГУПИ, 2014. 126 с.
10. Колпин М. А., Москвин Б. В. Подход к оптимизации технологии оперативного планирования применения средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами // i-methods. 2015. Т. 7, № 3. С. 10–14.
11. Минаков Е. П., Привалов А. Е., Бугайченко П. Ю. Модель оценивания эффективности управления многоспутниковыми орбитальными системами // Труды МАИ. 2022. № 125. С. 1–26.
12. Аничкин А. С., Семенов В. А. Современные модели и методы теории расписаний // Труды Института программирования РАН. 2014. Т. 26, № 3. С. 5–50.
13. Лазарев А. А. Теория расписаний. Методы и алгоритмы : моногр. М. : ИПУ РАН, 2019. 408 с.
14. Зимин И. Н., Иванюков Ю. П. Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1971. Т. 11, № 3. С. 632–641.
15. Калинин В. Н., Соколов Б. В. Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования ком-
1. Nagibin S. Ya., Pochukaev V. N., Ukhlinov L. M. Struktura i printsipy postroeniia matematicheskogo obespecheniia Tsentra upravleniia poletami kosmicheskikh apparatov. *Vestnik Rossiiskogo obshchestva informatiki i vychislitelnoi tekhniki*. 1995(5):66–72. (In Russian).
2. Manuilov Yu. S., Kalinin V. N. Upravlenie kosmicheskimi apparatami i sredstvami nazemnogo kompleksa upravleniia. St. Petersburg: Mozhaisky Military Aerospace Academy; 2010. 609 p. (In Russian).
3. Kalinin V. N. Mathematical model of informational interaction of the spacecraft with a surface of the Earth. *SPIRAS Proceedings*. 2014;(3):33–56. (In Russian).
4. Manuilov Yu. S., Moskvina B. V., Pavlov D. A. Model planirovaniia raspredelennoi obrabotki informatsii v razlichnykh zveniyakh avtomatizirovannykh sistem upravleniia kosmicheskimi apparatami. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2014;(642):32–35. (In Russian).
5. Komandrovskiy V. G. Job scheduling for a computing system. *Avtomatika i telemekhanika*. 2005;(12):65–74. (In Russian).
6. Golubev I. A. Planirovanie zadach v raspredelennykh vychislitelnykh sistemakh na osnove metadannykh. Cand. Sci. (Engineering) Thesis. St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University; 2014. 135 p. (In Russian).
7. Broberg J. A. Effective task assignment strategies for distributed systems under highly variable workloads. Dr. (Philosophy) Thesis. Melbourne, Victoria, Australia: RMIT University; 2006. 208 p.
8. Kleinrock L. Queuing systems. Vol. 2. Computer applications. Tsybakov B. S., editor. Moscow: Mir; 1979. 600 p. (In Russian).
9. Bakanov V. M. Mnogomashinnye komplekсы i mnogoprotsessornye sistemy. Moscow: Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science; 2014. 126 p. (In Russian).
10. Kolpin M. A., Moskvina B. V. The approach to technology optimization of operational planning of the use of landing automated complex spaceship control. *i-methods*. 2015;7(3):10–14. (In Russian).
11. Minakov E. P., Privalov A. E., Bugaichenko P. Yu. A model for evaluating the control efficiency of multi-satellite orbital systems. *Trudy MAI*. 2022;(125):1–26. (In Russian).
12. Anichkin A. S., Semenov V. A. A survey of emerging models and methods of scheduling. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS (Proceedings of ISP RAS)*. 2014;26(3):5–50. (In Russian).
13. Lazarev A. A. Teoriia raspisaniia. Metody i algoritmy. Monograph. Moscow: V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2019. 408 p. (In Russian).
14. Zimin I. N., Ivanilov Yu. P. Solution of network planning problems by reducing them to optimal control problems. *Zhurnal vychislitelnoi matematiki i matematicheskoi fiziki*. 1971;11(3):632–641. (In Russian).

- плекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика. 1987. Вып. 1. С. 106–114.
16. Ivanov D., Dolgui A., Sokolov B. et al. A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0. *International Journal of Production Research*. 2016;54(2):386–402.
 17. Richter K. Dynamic tasks of discrete optimization. Berlin, Boston: De Gruyter; 1982. 114 p.
 18. Корнеев В. П. Методы оптимизации. М. : Высш. шк., 2007. 663 с.
 19. Korneenko V. P. An efficient algorithm of dead-end controls for solving combinatorial optimization problems. *Automation and Remote Control*. 2021;82:1692–1705.
 20. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику. М. : Наука, 1986. 384 с.
 21. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных / пер. с англ. В. Е. Привальского, А. И. Кочубинского ; под ред. И. Н. Коваленко. М. : Мир, 1989. 540 с.
 22. Климов Г. П., Ляху А. К., Матвеев В. Ф. Математические модели систем с разделением времени. Кишинев : Штиинца, 1983. 110 с.
 23. Беллман Р. Динамическое программирование / пер. с англ. И. М. Андреевой, А. А. Корбута, И. В. Романовского, И. Н. Соколовой ; под ред. Н. Н. Воробьева. М. : Изд-во иностр. лит., 1960. 400 с.
 24. Сигал И. Х., Иванова А. П. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. М. : Физматлит, 2002. 240 с.
 25. Pisinger D. A minimal algorithm for the 0-1 Knapsack Problem. *Operations Research*. 1997;46(5):758–767.
 26. Конвей Р. Б., 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.
 27. Корнеев В. П. Метод локального агрегирования данных объектов с многоуровневой структурой в порядковых шкалах // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD-2021) : труды 14-й Междунар. конф., 27–29 сентября 2021 г., г. Москва. М. : ИПУ РАН, 2021. С. 485–493.
 28. Корнеев В. П. Метод аппроксимационной матрицы формирования весов объектов в многокритериальных задачах выбора // Вестник кибернетики. 2021. № 1. С. 51–62.
 15. Kalinin V. N., Sokolov B. V. A dynamic model and an optimal scheduling algorithm for a set of activities with bans on interrupts. *Avtomatika i telemekhanika*. 1987;(1):106–114. (In Russian).
 16. Ivanov D., Dolgui A., Sokolov B. et al. A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0. *International Journal of Production Research*. 2016;54(2):386–402.
 17. Richter K. Dynamic tasks of discrete optimization. Berlin, Boston: De Gruyter; 1982. 114 p. (In German).
 18. Korneenko V. P. Metody optimizatsii. Moscow: Vyssh. shk.; 2007. 663 p. (In Russian).
 19. Korneenko V. P. An efficient algorithm of dead-end controls for solving combinatorial optimization problems. *Automation and Remote Control*. 2021;82:1692–1705.
 20. Yablonsky S. V. Vvedenie v diskretnuiu matematiku. Moscow: Nauka; 1986. 384 p. (In Russian).
 21. Bendat J. S., Piersol A. G. Random data: Analysis and measurement procedures. Privalsky V. E., Kochubinsky A. I., translators; I. N. Kovalenko, editor. Moscow: Mir; 1989. 540 p. (In Russian).
 22. Klimov G. P., Lyakhu A. K., Matveev V. F. Matematicheskie modeli sistem s razdeleniem vremeni. Kishinev: Shtiintsia; 1983. 110 p. (In Russian).
 23. Bellman R. Dynamic programming. Andreeva I. M., Korbut A. A., Romanovsky I. V., Sokolova I. N., translators; N. N. Vorobyev, editor. Moscow: Izd-vo inostr. lit.; 1960. 400 p. (In Russian).
 24. Sigal I. Kh., Ivanova A. P. Vvedenie v prikladnoe diskretnoe programmirovaniye: modeli i vychislitelnyye algoritmy. Moscow: Fizmatlit; 2002. 240 p. (In Russian).
 25. Pisinger D. A minimal algorithm for the 0-1 Knapsack Problem. *Operations Research*. 1997;46(5):758–767.
 26. Conway R. W., Maxwell W. L., Miller L. W. Theory of scheduling. Kokotushkin V. A., Mikhalev D. G., translators; Basharin G. P., editor. Moscow: Nauka; 1975. 359 p. (In Russian).
 27. Korneenko V. P. Metod lokalnogo agregirovaniia dannykh obektov s mnogourovnevoi strukturoi v poriadkovykh shkalakh. In: *Proceedings of the Fourteenth International Conference "Management of Large-Scale System Development (MLSD-2021)"*, September 27–29, 2021, Moscow. Moscow: V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2021. p. 485–493. (In Russian).
 28. Korneenko V. P. Approximation matrix method for weights formation of objects in multicriteria problems. *Proceedings in Cybernetics*. 2021;(1):51–62. (In Russian).

Информация об авторе

В. П. Корнеев – кандидат технических наук, доцент.

Information about the author

V. P. Korneenko – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

Научная статья

УДК 519.237.5:519.854.33

DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-99-104

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИИ РИСКА МЕТОДОМ АНТИРОБАСТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Сергей Иванович Носков^{1✉}, *Владимир Викторович Тирских*²

^{1, 2} *Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия*

¹ *sergey.noskov.57@mail.ru* ✉, <https://orcid.org/0000-0003-4097-2720>

² *tirskikh1963@mail.ru*

Аннотация. В работе дан краткий обзор публикаций по методам идентификации параметров регрессионных моделей, основанных в том числе на метрике Чебышева. Они касаются, в частности: разработки алгоритма однозначного определения чебышевской проекции; нового метода, сочетающего расстояние Минковского с расстоянием Чебышева, которые используются в качестве меры подобия в процессе кластеризации при группировке данных; обобщения частной постановки задачи подгонки кривых или поверхностей к наблюдаемым или измеренным данным, связанной с заменой наименьших квадратов нормой Чебышева; интегральных оценок антропогенной трансформации территории с использованием многомерных статистических методов. Разработан способ оценивания неизвестных параметров регрессионной кусочно-линейной функции риска методом антиробастного оценивания, сводящийся к решению задачи линейно-булевого программирования. Построена функция риска динамики цены одного квадратного метра общей площади квартир на рынке жилья в Российской Федерации с помощью методов наименьших модулей и антиробастного оценивания. В качестве независимых факторов в модели использованы средние цены на блоки стеновые силикатные, плиты перекрытий железобетонные и товарный бетон. Высокие значения критериев адекватности указывают на то, что оба построенных варианта модели достаточно хорошо описывают динамику выходного показателя и могут успешно использоваться для решения задач, связанных с прогнозированием. Установлено, что число максимальных по модулю ошибок аппроксимации модели риска при использовании метода антиробастного оценивания равно трем, т. е. числу независимых переменных.

Ключевые слова: регрессионная модель, кусочно-линейная функция риска, метод антиробастного оценивания, задача линейно-булевого программирования, цены на жилье

Для цитирования: Носков С. И., Тирских В. В. Идентификация параметров кусочно-линейной функции риска методом антиробастного оценивания // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 3. С. 99–104. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-99-104.

Original article

IDENTIFYING PARAMETERS OF A PIECEWISE LINEAR RISK FUNCTION WITH A METHOD OF ANTIROBUST ESTIMATION

Sergey I. Noskov^{1✉}, *Vladimir V. Tirskikh*²

^{1, 2} *Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

¹ *sergey.noskov.57@mail.ru* ✉, <https://orcid.org/0000-0003-4097-2720>

² *tirskikh1963@mail.ru*

Abstract. The article reviews literature on identification methods for parameters of regression models, including those based on Chebyshev metrics. The publications contain data on the development of an algorithm for the unambiguous definition of Chebyshev projection; a new method that combines Minkowskian distance and Chebyshev distance, with both being used as a similarity measure in the clustering process when grouping data; generalizations of particular goal setting for curves and surface fitting to the data observed or calculated

as a result of replacing least squares with the Chebyshev norm; and integral estimates of the anthropogenic transformation of the territory using multidimensional statistical methods. Using the anti-robust method of estimation, the authors have developed a method to estimate unknown parameters of a regression piecewise linear risk function, whose aim is to solve a linear Boolean programming problem. The risk function of the dynamics of the price per square meter of living space of dwellings in the housing market in the Russian Federation is built using the least modules method and the anti-robust estimation method. Average pricing for silicate wall blocks, concrete floor slabs, and ready-mixed concrete are used as independent factors in the model. Both versions of the models built describe the dynamics of the output indicator profoundly, as evidenced by the high values of adequacy criteria, and therefore can efficiently solve the forecasting problems. It has been established that the number of maximum module errors of the risk model approximation is equal to three, i. e. the number of independent variables, when applying the anti-robust method.

Keywords: regression model, piecewise linear risk function, method of antirobust estimation, linear Boolean programming problem, housing prices

For citation: Noskov S. I., Tirskikh V. V. Identifying parameters of a piecewise linear risk function with a method of antirobust estimation. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(3):99–104. DOI 10.35266/1999-7604-2023-3-99-104.

ВВЕДЕНИЕ

Методы регрессионного анализа активно используются при исследовании сложных систем средствами математического моделирования. При этом идентификация параметров регрессионных моделей производится, как правило, посредством минимизации расстояния между вычисленными и фактическими значениями зависимых модельных переменных. В регрессионном анализе существует несколько способов задания этого расстояния: евклидово расстояние, соответствующее методу наименьших квадратов (МНК) [1–3], городское расстояние (метод наименьших модулей – МНМ) [4–6], расстояние Чебышева (метод антиробастного оценивания – МАО) [7]. Следует отметить, что исследованию и применению расстояния Чебышева в рамках прикладной математики посвящено значительное количество работ. В работе [8] представлен алгоритм однозначного определения так называемой чебышевской проекции. В [9] используется новый метод, сочетающий расстояние Минковского с расстоянием Чебышева, которое используется в качестве меры подобия в процессе кластеризации при группировке данных. В статье [10] рассматривается естественное обобщение частной постановки задачи подгонки кривых или поверхностей к наблюдаемым или измеренным данным, связанной с заменой наименьших квадратов нормой Чебышева. Этот критерий может быть более подходящим в контексте решений о принятии/отклонении изготов-

ленных деталей. Получившаяся задача имеет некоторые интересные особенности: она имеет много структур, которые можно использовать, но обычно решение не является уникальным. В работе [11] расстояние Чебышева применяется при получении интегральных оценок антропогенной трансформации территории с использованием многомерных статистических методов. В работе [12] приведено сравнение известных метрик с точки зрения их вычислительной сложности. Сделано предположение о возможном использовании комбинированных метрик расстояния.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим регрессионную кусочно-линейную функцию риска [13]:

$$y_k = \max\{\alpha_1 x_{k1}, \alpha_2 x_{k2}, \dots, \alpha_m x_{km}\} + \varepsilon_k, \quad (1)$$
$$k = \overline{1, n},$$

где k – номер наблюдения;

y и x_i , $i = \overline{1, m}$ – соответственно зависимая (выходная, внутренняя) и независимые (входные, внешние) переменные, значения которых считаются заданными;

α_i , $i = \overline{1, m}$ – подлежащие определению оценки параметров;

ε_k – ошибки приближения;

n – длина выборки.

Отметим, что кусочно-линейные конструкции гораздо реже линейных применяются при

исследовании сложных объектов в силу более высокой вычислительной сложности идентификации неизвестных параметров. В то же время, кусочно-линейные модели весьма содержательны и хорошо интерпретируются. В качестве как входных, так и выходных факторов здесь могут использоваться негативные (вызывающие регресс и/или стагнацию) для объекта исследования показатели, такие как убытки, загрязнения, риски, технические сбои, отказы оборудования, ущерб и т. д. При этом, в соответствии с (1), значение переменной y определяется максимальным значением одного из негативных независимых факторов, а любое уменьшение значений других переменных на это обстоятельство не влияет.

Для определения значений параметров модели (1) необходимо минимизировать функцию потерь, соответствующую выбранному методу идентификации. Для МНМ это:

$$J_1(\alpha) = \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k| \rightarrow \min, \quad (2)$$

для МНК:

$$J_2(\alpha) = \sum_{k=1}^n \varepsilon_k^2 \rightarrow \min,$$

для MAO:

$$J_\infty(\alpha) = \lim_{p \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k|^p = \max_{k=1, n} |\varepsilon_k| \rightarrow \min. \quad (3)$$

Три упомянутых выше метода определения оценок параметров регрессионных моделей обладают следующими свойствами по отношению к выбросам (наблюдениям, не согласующимся с выборкой данных в целом): МНМ их игнорирует; MAO, напротив, к ним тяготеет; МНК является в этом отношении своего рода компромиссом между МНМ и MAO.

В работе [13] показано, что задача (2) может быть сведена к следующей задаче линейно-булевого программирования (ЛБП):

$$z_k + u_k - v_k = y_k, k = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$z_k \geq \alpha_i x_{ki}, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, m}, \quad (5)$$

$$\alpha_i x_{ki} - z_k \geq (\sigma_{ki} - 1)M, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, m}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m \sigma_{ki} = 1, k = \overline{1, n}, \quad (7)$$

$$u_k \geq 0, v_k \geq 0, k = \overline{1, n}, \quad (8)$$

$$\sigma_{ki} \in \{0, 1\}, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, m}, \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) \rightarrow \min, \quad (10)$$

где M – заранее выбранное большое положительное число,

$$u_k + v_k = |\varepsilon_k|, u_k - v_k = \varepsilon_k, \\ z_k = \max\{\alpha_1 x_{k1}, \alpha_2 x_{k2}, \dots, \alpha_m x_{km}\}.$$

Решение задачи ЛБП (4)–(10) не должно вызывать вычислительных трудностей ввиду наличия эффективных компьютерных программ, в частности, LPSolve [14].

Для сведения задачи (3) к задаче ЛБП введем новую неизвестную переменную r :

$$r = \max_{k=1, n} |\varepsilon_k|.$$

Тогда будут справедливы неравенства:

$$u_k + v_k - r \leq 0, k = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Таким образом, эквивалентная задаче (3) задача ЛБП будет включать в себя ограничения (4)–(9), (11) и целевую функцию:

$$r \rightarrow \min. \quad (12)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применим полученный способ идентификации неизвестных параметров кусочно-линейной функции риска с помощью MAO для построения модели средней цены одного м² общей площади квартир на рынке жилья в Российской Федерации, воспользовавшись поквартальной статистической информацией – с 1 кв. 2017 по 4 кв. 2020 гг. [15].

Введем следующие обозначения:

- y – цена одного м² общей площади квартир;
- x_1 – средние цены на блоки стеновые силикатные, руб./м³;
- x_2 – средние цены на плиты перекрытий железобетонные, руб./м³;
- x_3 – средние цены на товарный бетон, руб./м³.

Будем строить функцию риска вида:

$$y_k = \max\{\alpha_1 x_{k1}, \alpha_2 x_{k2}, \alpha_3 x_{k3}\} + \varepsilon_k, k = \overline{1, 16}. \quad (13)$$

Применение МНМ путем решения задачи ЛБП (4)–(10) приводит к построению следующей модели:

$$y = \max\{17,14x_1, 7,95x_2, 13,8x_3\}, \quad (14)$$

$$E = 4,35 \%, r = 9\,872,88.$$

Здесь E – средняя относительная ошибка аппроксимации.

Рассчитаем для модели (14) ее вектор срабатываний λ , каждая компонента которого указывает на номер независимой переменной, на которой реализовался максимум в модели (1):

$$\lambda = (2, 2, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 2).$$

Использование МАО посредством решения задачи ЛБП (4)–(9), (11)–(12) позволяет получить следующую модель:

$$y = \max\{19,16x_1, 7,65x_2, 15,09x_3\}, \quad (15)$$

$$E = 6,37 \%, r = 6\,949,76,$$

$$\lambda = (2, 3, 1, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 1, 3, 3).$$

В таблице представлены результаты моделирования – фактические (y) и расчетные ($y^{\text{МНМ}}$ и $y^{\text{МАО}}$) значения зависимой переменной моделей (14) и (15), а также их ошибки аппроксимации ($\varepsilon^{\text{МНМ}}$ и $\varepsilon^{\text{МАО}}$).

Таблица

Результаты моделирования

Номер наблюдения	y	$y^{\text{МНМ}}$	$\varepsilon^{\text{МНМ}}$	$y^{\text{МАО}}$	$\varepsilon^{\text{МАО}}$
1	56 347,20	64 731,83	–8 384,6	62 257,03	–5 909,8
2	56 516,78	61 060,72	–4 543,9	61 554,50	–5 037,7
3	56 560,78	56 826,36	–265,58	63 510,40	–6 949,6
4	56 882,19	60 257,88	–3 375,6	63 831,94	–6 949,7
5	58 875,59	59 330,75	–455,16	63 816,85	–4 941,2
6	59 969,66	61 022,44	–1 052,7	62 936,66	–2 967,0
7	60 952,83	60 952,98	–0,15	62 658,21	–1 705,3
8	61 831,57	59 679,26	2 152,30	63 860,47	–2 028,9
9	60 705,14	60 741,04	–35,90	66 407,91	–5 702,7
10	61 618,25	58 472,13	3 146,11	63 927,33	–2 309,0
11	62 891,94	63 957,95	–1 066,0	64 207,29	–1 315,3
12	64 059,49	63 671,74	387,74	65 141,36	–1 081,8
13	71 503,24	70 070,36	1 432,87	67 391,49	4 111,7
14	73 438,05	69 645,07	3 792,97	71 468,37	1 969,6
15	76 167,22	70 770,64	5 396,57	72 843,61	3 323,6
16	79 003,00	69 130,11	9 872,88	72 053,23	6 949,7

Примечание: составлено авторами.

Сопоставимо высокие значения критериев адекватности E и r указывают, что модели (14) и (15) достаточно хорошо описывают динамику выходного показателя (этот тезис подтверждает и рисунок) и могут успешно использоваться для решения задач, связанных, в частности, с прогнозированием.

Модель (15) несколько уступает зависимости (14) по критерию E , зато превосходит ее по критерию r . Но что еще более важно, в вектор срабатываний для первой модели

не вошла переменная x_3 , а для второй модели состав этого вектора полный – сработали все переменные.

Обращает на себя внимание еще один весьма интересный факт – число максимальных по модулю ошибок аппроксимации модели (13) при использовании МАО равно трем, т. е. числу независимых переменных. При использовании МАО для обычной линейной регрессии без свободного члена это число равнялось бы четырем [7].

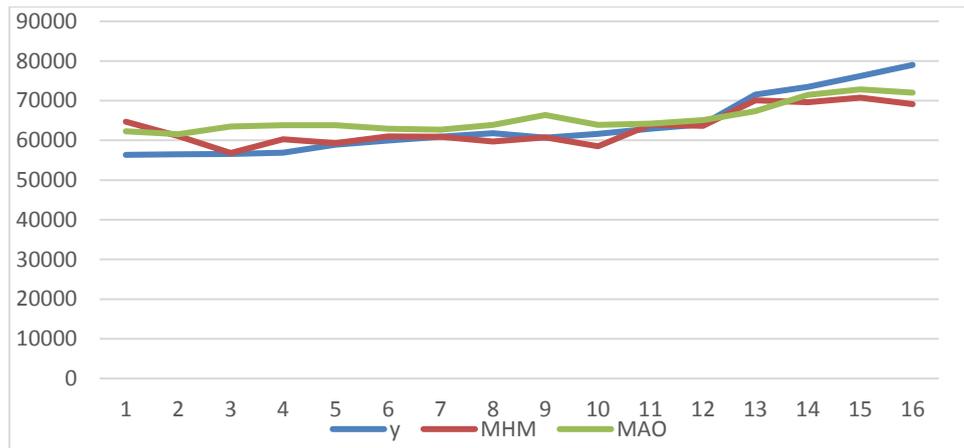


Рисунок. Фактические и расчетные значения зависимой переменной

Примечание: составлено авторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен способ оценивания неизвестных параметров регрессионной кусочно-линейной функции риска методом антиробастного оценивания, сводящийся к решению задачи линейно-булевого программирования. Построена функция риска динамики цены одного квадратного метра общей площади квартир на рынке жилья в Российской Федерации с помощью методов наименьших модулей и антиробастного оценивания. В качестве независимых факторов в модель включены средние цены: на блоки стеновые силикатные, плиты перекрытий железобетонные и на

товарный бетон. Сопоставимо высокие значения критериев адекватности указывают на то, что оба построенных варианта модели достаточно хорошо описывают динамику выходного показателя и могут успешно использоваться для решения задач, связанных, в частности, с прогнозированием. Выявлен тот факт, что число максимальных по модулю ошибок аппроксимации модели риска при использовании МАО равно трем, т. е. числу независимых переменных. Для обычной линейной регрессии без свободного члена это число равнялось бы четырем.

Список источников

1. Айвазян С. А. Методы эконометрики. М. : Магистр ; Инфра-М, 2010. 506 с.
2. Орлов А. И. Прикладная статистика. М. : Экзамен, 2004. 656 с.
3. Greene W. H. Econometric analysis. NY: New York University; 2002. 1026 p.
4. Тырсин А. Н., Азарян А. А. Оценивание нелинейных регрессионных зависимостей на основе обобщенного метода наименьших модулей // Обзорные прикладной и промышленной математики. 2018. Т. 25, № 2. С. 185–187.
5. Панюков А. В., Тырсин А. Н. Взаимосвязь взвешенного и обобщенного вариантов метода наименьших модулей // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. 2007. № 1. С. 6–11.
6. Миллер Б. М., Колосов К. С. Робастное оценивание на основе метода наименьших модулей и фильтра Калмана // Автоматика и телемеханика. 2020. № 11. С. 72–92. DOI 10.31857/S0005231020110057.
7. Носков С. И. Метод антиробастного оценивания параметров линейной регрессии: число максималь-

References

1. Aivazyan S. A. Metody ekonometriki. Moscow: Magistr; Infra-M; 2010. 506 p. (In Russian).
2. Orlov A. I. Prikladnaia statistika. Moscow: Ekzamen; 2004. 656 p. (In Russian).
3. Greene W. H. Econometric analysis. NY: New York University; 2002. 1026 p.
4. Tyrsin A. N., Azaryan A. A. Otsenivanie nelineinykh regressionnykh zavisimostei na osnove obobshchennogo metoda naimenshikh modulei. *Obozrenie prikladnoi i promyshlennoi matematiki*. 2018;25(2):185–187. (In Russian).
5. Panyukov A. V., Tyrsin A. N. Vzaimosviaz vzveshennogo i obobshchennogo variantov metoda naimenshikh modulei. *Izvestiia Chelyabinskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*. 2007;(1):6–11. (In Russian).
6. Miller B. M., Kolosov K. S. Robust estimation based on the least absolute deviations method and the Kalman filter. *Avtomatika i telemekhanika*. 2020;(11):72–92. DOI 10.31857/S0005231020110057. (In Russian).
7. Noskov S. I. Method of antirobast estimation of linear regression parameters: Number of maximum on the

- ных по модулю ошибок аппроксимации // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 1. С. 51–54.
8. Зоркальцев В. И. Чебышевские приближения могут обходиться без условия Хаара // Динамические системы, оптимальное управление и математическое моделирование : материалы Междунар. симпозиума, посвящ. 100-летию математического образования в Восточной Сибири и 80-летию со дня рождения профессора О. В. Васильева, 07–12 октября 2019 г., г. Иркутск. Иркутск : Иркут. гос. ун-т, 2019. С. 29–33.
 9. Surono S., Putri R. D. A. Optimization of Fuzzy C-Means clustering algorithm with combination of Minkowski and Chebyshev distance using principal component analysis. *Int J Fuzzy Syst.* 2021;23:139–144.
 10. Al-Subaihi I., Watson G. A. Fitting parametric curves and surfaces by l_∞ distance regression. *Bit Numer Math.* 2005;45:443–466.
 11. Шабанов Д. И., Иолин М. М., Борзова А. С. и др. Методика получения интегральных оценок антропогенной трансформации территории с использованием многомерных статистических методов // Геология, география и глобальная энергия. 2014. № 4. С. 176–185.
 12. Сидорович А. С., Сасин Е. А. Сравнительная характеристика основных метрик расстояний // Математические методы в технике и технологиях : материалы XXXI Междунар. науч. конф., 22–26 октября 2018 г., г. Минск. Т. 8. Минск, 2018. С. 82–84.
 13. Носков С. И. Идентификация параметров кусочно-линейной функции риска // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Восьмой Междунар. науч.-практ. конф., 28 марта – 01 апреля 2017 г., г. Иркутск. В 2 т. Т. 1. Иркутск : ИРГУПС, 2017. С. 417–421.
 14. Шипицына Р. Е., Витвицкий Е. Е. Сравнение удобства использования программных продуктов при решении транспортной задачи линейного программирования: LPSolve IDE и Microsoft Excel // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : сб. материалов V Национал. науч.-практич. конф., 28–29 апреля 2022 г., г. Омск. Омск : Сибир. гос. автомобильно-дорожный ун-т (СибАДИ), 2022. С. 250–254.
 15. Носков С. И., Хоняков А. А. Применение функции риска для модельного описания колебания цен на рынке недвижимости // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 3. С. 77–82. DOI 10.52684/2312-3702-2021-37-3-77-82.
- module of approximation errors. *South-Siberian Scientific Bulletin.* 2020;(1):51–54. (In Russian).
8. Zorkaltsev V. I. Chebyshevskie priblizheniia mogut obkhoditsia bez usloviia Khaara. In: *Proceedings of the International Symposium devoted to the 100th Anniversary of Mathematical Education in the East Siberia and 80th Anniversary of birth of Prof. Vasilyev O. V. "Dinamicheskie sistemy, optimalnoe upravlenie i matematicheskoe modelirovanie"*, October 7–12, 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State University; 2019. p. 29–33. (In Russian).
 9. Surono S., Putri R. D. A. Optimization of Fuzzy C-Means clustering algorithm with combination of Minkowski and Chebyshev distance using principal component analysis. *Int J Fuzzy Syst.* 2021;23:139–144.
 10. Al-Subaihi I., Watson G. A. Fitting parametric curves and surfaces by l_∞ distance regression. *Bit Numer Math.* 2005;45:443–466.
 11. Shabanov D. I., Iolin M. M., Borzova A. S. et al. Use of multivariate statistical methods for estimation of the spatial changes in anthropogenic transformation (land use). *Geology, Geography and Global Energy.* 2014;(4):176–185. (In Russian).
 12. Sidorovich A. S., Sasin E. A. Sravnitelnaia kharakteristika osnovnykh metrik rasstoianii. In: *Proceedings of the XXXI International Scientific Conference "Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiiakh"*, October 22–26, 2018, Minsk. Vol. 8. Minsk; 2018. p. 82–84. (In Russian).
 13. Noskov S. I. Identifikatsiia parametrov kusochno-lineinnoi funktsii riska. In: *Proceedings of the Eighth International Research-to-Practice Conference "Transportnaia infrastruktura Sibirskogo regiona"*, March 28 – April 1, 2017, Irkutsk. In 2 vols. Vol. 1. Irkutsk: IrGUPS; 2017. p. 417–421. (In Russian).
 14. Shipitsyna R. E., Vitvitsky E. E. Comparison of the convenience of using two software products in solving the transport problem of linear programming: LPSolve IDE and Microsoft Excel. In: *Proceedings of the V National Research-to-Practice Conference "Obrzovanie. Transport. Innovatsii. Stroitelstvo"*, April 28–29, 2022, Omsk. Omsk: The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI); 2022. p. 250–254. (In Russian).
 15. Noskov S. I., Khonyakov A. A. Application of risk function to model description of price fluctuations in the real estate market. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region.* 2021;(3):77–82. DOI 10.52684/2312-3702-2021-37-3-77-82. (In Russian).

Информация об авторах

С. И. Носков – доктор технических наук, профессор.
В. В. Тирских – кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the authors

S. I. Noskov – Doctor of Sciences (Engineering), Professor.
V. V. Tirsikh – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

50 ЛЕТ РЫЖАКОВУ ВИТАЛИЮ ВЛАДИМИРОВИЧУ



14 сентября 2023 г. исполнилось 50 лет кандидату физико-математических наук, заведующему кафедрой радиоэлектроники и электроэнергетики Политехнического института Сургутского государственного университета Рыжакову Виталию Владимировичу.

Виталий Владимирович после окончания школы поступил и с отличием окончил в 1995 г. учебу в Томской государственной академии систем управления и радиоэлектроники (ТАСУР) на факультете «Промышленная электроника» и в этом же году приехал работать в созданный в 1993 г. Сургутский государственный университет – первый университет в ХМАО-Югре.

С 1995 по 1999 гг. работал в должности инженера с совмещением должности ассистента на кафедре радиоэлектроники, с 1999 по 2005 гг. – в должности старшего преподавателя, а с 2006 г. – в должности доцента кафедры радиоэлектроники.

Плодотворным стал для В. В. Рыжакова 2005 г. – 23 декабря прошла его защита диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в Диссертационном совете ГОУ ВПО «Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры» (научный руководитель – доктор технических наук, профессор Бадулин Николай Николаевич). Тема диссертационного исследования «Применение численного метода

формирования достаточной статистики для построения искусственных нейронных сетей распознавания радиолокационных объектов по поляризационным признакам» и сегодня как никогда актуальна.

В 2007 г. ректор Сургутского государственного университета приглашает Виталия Владимировича на должность начальника научного отдела, в 2009 г. он возглавил управление по науке и инновациям, а в июле 2010 г. приступает к исполнению обязанностей проректора СурГУ по внешним связям и развитию. В это же время он проходит профессиональную переподготовку в рамках Президентской программы подготовки управленческих кадров (г. Красногорск) по направлению «Управление инновационными проектами» в Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации. В Сургутском государственном университете под руководством Виталия Владимировича реализуется проект духовно-нравственного развития «Диалоги о семейных ценностях, или как найти рецепт счастья», собравший за десять дней его реализации 3 700 участников на 27 мероприятиях. Этот проект никого из участников не оставил равнодушным и через два года команда единомышленников под его руководством вдохнула в содержание проекта новую жизнь и представила его результаты Губернатору Ханты-Мансийского автономного округа – Югры Н. В. Комаровой.

Затем были разработаны и реализованы еще множество проектов, в которых Виталий Владимирович участвовал как руководитель и организатор:

- 2015 г. – руководитель детского образовательного проекта «Ugra Mobile Apps Contest – конкурс мобильных приложений Югры» UMAC-2015 для школьников и студентов, реализованного совместно с ПАО «Вымпелком» и ООО «Вектор»;

- 2015–2017 гг. – организатор региональных чемпионатов JuniorSkills по методике WorldSkills, подготовка команд участников, региональный эксперт JuniorSkills по компетенции «Интернет вещей»;

- 2015–2019 гг. – эксперт Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд И. М. Бортника) по направлениям «Электроэнергетика», «Информационные и телекоммуникационные технологии»;

- 2017–2018 гг. – региональный представитель Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд И. М. Бортника);

- с 2018 г. по настоящее время – организатор серии профориентационных мероприятий для школьников: «Уроки НТИ», проектная игра по формату Digital Craft, мастер-классы для родителей и школьников, мастер-класс для школьников «Ловушки ОГЭ/ЕГЭ», мастер-класс для родителей «Что нужно знать родителям о ОГЭ/ЕГЭ и поступлении?», организация подготовки школьников по компетенциям «Электроника и электротехника», «Компьютерные сети», «Моделирование и прототипирование», «Интернет инженерия и программирование», «Интернет-маркетинг», «Фабрика миров»;

- с 2021 г. – соруководитель образовательной программы «SISS: Промышленный инжиниринг» регионального образовательного проекта Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Таланты-2030».

С ноября 2014 г. и по настоящее время Виталий Владимирович руководит кафедрой радиоэлектроники и электроэнергетики. Под его руководством на кафедре были лицензированы и прошли процедуру государственной аккредитации направления бакалавриата, ма-

гистратуры и аспирантуры энергетического профиля, в 2018–2019 гг. образовательные программы, реализуемые на кафедре, претерпели значительные изменения и были переориентированы на подготовку руководителей инвестиционных инжиниринговых проектов в промышленности, что повлекло за собой пересмотр концептуальных принципов их реализации, с 2020 г. на системной основе работает ежегодная международная научно-практическая конференция «Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России», формируется научно-образовательная школа, ориентированная на решение прикладных научно-технических задач в сфере управления системами распределенной энергетики.

В 2017–2018 гг. В. В. Рыжаков руководил АУ ХМАО-Югры «Технопарк высоких технологий», совмещая заведование кафедрой и преподавание в СурГУ.

Виталий Владимирович всегда в эпицентре науки. Он не перестает сам совершенствоваться и передает свои знания и опыт молодому поколению ученых и преподавателей, работающих в Сургутском государственном университете. В 2016–2017 учебном году прошел профессиональную переподготовку в БУ ВО ХМАО-Югры «Сургутский государственный педагогический университет» по образовательной программе «Педагогическое образование. Профиль “Технология”», в 2020 г. – по программе «Исследования и разработки в IT» в Томском государственном университете, а с 2022 г. и по настоящее время проходит обучение по основной образовательной программе по направлению подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень магистратуры) в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта» (г. Новосибирск).

Его стаж научно-педагогической работы, в том числе стаж педагогической работы в вузе составляет полных 28 лет. И все это время он верен одному учреждению высшего образования – Сургутскому государственному университету, в который он пришел молодым специалистом и за эти 28 лет состоялся как ученый, у которого еще все впереди. Имеет 96 публикаций, из них 20 учебно-методических, 76 научных работ, получил 3 патента на

изобретение, 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Виталий Владимирович ведет занятия по 7 учебным дисциплинам, отвечает за организацию и проведение учебных и производственных практик и проектной работы студентов на кафедре. Под его руководством защищено 80 дипломных проектов и выпускных квалификационных работ.

Его научный труд отмечен Почетной грамотой Департамента образования Администрации города Сургута, Почетной грамотой

Тюменской областной Думы, Благодарственным письмом Департамента образования и науки Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Свой первый юбилей Виталий Владимирович встречает в полном расцвете творческих сил. Коллектив кафедры радиоэлектроники и электроэнергетики, коллеги Сургутского государственного университета поздравляют его и от всей души желают ему крепкого здоровья, счастья, новых научных достижений и талантливых учеников.

*Кафедра радиоэлектроники и электроэнергетики
Политехнического института,
Сургутский государственный университет*

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания <https://www.vestcyber.ru> и в базе данных Научной электронной библиотеки на сайте elibrary.ru, сведения о публикуемых материалах включаются в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Адрес учредителя и издателя:
бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры
«Сургутский государственный университет»,
628412, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Сургут, пр. Ленина, 1. Тел. +7 (3462) 76-29-29

Дата опубликования 21.11.2023. Формат 60 × 84/8
Уч.-изд. л. 10,8. Заказ № 239. Цена свободная